

Veikko Suihkonen

KONENÄKÖTUTKIMUS

Case: Tiivituote Oy

Opinnäytetyö

CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU

Tuotantotalouden koulutusohjelma

Huhtikuu 2015

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieskan yksikkö / tekniikka	Aika Huhtikuu 2015	Tekijä Veikko Suihkonen
Koulutusohjelma Tuotantotalouden koulutusohjelma		
Työn nimi KONENÄKÖTUTKIMUS –Case Tiivituote		
Työn ohjaajat Jari Kaarela & Sakari Pieskä		Sivumäärä 56
Työelämäohjaaja Simo-Pekka Kivioja / Kivioja Engineering Oy		
<p>Tässä työssä tehtiin alustava tutkimus konenäön mahdollisuuksista ikkunateollisuuden sisäpuitetuotannossa. Työssä selvitettiin, minkälaisella laitteistolla lajittelukonetta kannattaa lähteä suunnittelemaan sekä arvioitiin todellista työmäärää, jonka koneen toteuttaminen vaatii. Työ toteutettiin teollisen yrityksen todellisiin tarpeisiin. Työn varsinainen tilaaja oli Kivioja Engineering Oy ja tutkimusongelma perustuu Tiivituotteen (Inwido Finland Oy) tarpeisiin.</p> <p>Laitteistoja lähdettiin tutkimaan erityisesti laitetoimittaja Omronin valikoimista. Syynä tähän olivat työn tilaajan toimiminen Omronin kumppanina ja sen mukanaan tuomat yhteistyömahdollisuudet. Aluksi työssä tutustuttiin Omronin FQ-M -kameraan ja sen jälkeen siirryttiin käyttämään Omronin Xpectia -sarjan FZ-2 –kameralaitteistoa sekä FH-3050-20 kameralaitteistoa.</p> <p>Kameralaitteistoilla päästiin testaamaan oikeita kappaleita menestyksellisesti. Vikatyypeille löydettiin tarvittavat valaistusolosuhteet ja työkalut. Työssä päästiin tavoitteisiin ja saatiin käsitys, minkälaisella laitteistolla lajittelukonetta kannattaa lähteä suunnittelemaan. Lisäksi projektin edetessä opittiin huomattavan paljon konenäöstä ja konenäkötyökaluista yleisesti. Tämän työn pohjalta asetettiin jatko projekti, missä asiaa tutkitaan edelleen ja uuden projektin tavoitteena oli päästä lähemmäksi toimivaa lajittelukonetta.</p>		
Asiasanat Konenäkö, Laaduntarkastus, Optiikka		

ABSTRACT

Unit Centria Ylivieska / Engineering	Date April 2015	Author Veikko Suihkonen
Degree programme Industrial management / Robotics and automatisaton		
Name of thesis MACHINE VISION STUDY –Case Tiivituote		
Instructors Jari Kaarela and Sakari Pieskä		Pages 56
Supervisor Simo-Pekka Kivioja / Kivioja Engineering Oy		
<p>The objective of this thesis was to create preliminary research about possibilities of machine vision inspection in windows construction and in particularly sash frame production. Key part of this thesis was to find out, what kind of machinery is needed in this particularly case and how much work it takes to design such of a system. The work was commissioned by Kivioja Engineering Oy and Tiivituote (Inwido Finland Oy).</p> <p>Machinery involved in study was provided by Omron Industrial Automation. Reason for choosing Omron for provider was past history with Omron. Kivioja Engineering is Omron partner and provider. Machine vision systems tested in this study was Omron FQ-M, Xpectia FZ-2 and FH-3050-20.</p> <p>Practical tests were made with samples provided by Tiivituote. Objectives for this thesis were met and now it is known, what kind of machinery is needed for this case. It was also now known what kind of lighting and machine vision tools are needed for faults that existed in samples. Author learned much about machine vision, lighting and machine vision tools. Follow up project was set based on this thesis. This follow up project aims to design working quality control machine based on study of this thesis.</p>		
Key words Computer vision, Inspection, Machine vision, Optics		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

FH	Omronin 2013 julkaisema Xpectia - sarjan konenäkölaitteisto
Flow	Konenäkölaitteiston scenen työkalujen hierarkkinen asetus.
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> . Vika- ja vaikutusanalyysi, jossa pyritään tunnistamaan ja ennaltaehkäisemään prosessin tai tuotteen riskejä ja vikatiloja.
FZ2	Omronin 2007 julkaisema Xpectia – sarjan konenäkölaitteisto
Jog fw	Viesti taajuusmuuttajalle, aja eteenpäin.
Kiertoaika	Konenäköjärjestelmän käyttämä aika, jonka aikana tehdään yksi tarkastussykli sisältäen kuvan ottamisen, kuvan prosessoinnin, tarkastustyökalujen tehtävät ja OR - tiedon lähettämisen
Konenäkö	Keino tutkia ja analysoida tosielämän tilanteita ja asioita visuaalisen tiedon perusteella tietokoneen avulla
MOD	<i>Minimun Object Distance</i> . Kameran linssin ominaisuus. Lyhin etäisyys, johon objektiivin pystyy tarkentamaan.
NG	”Hylätty” -viesti (Not Good).
NG/OK – tieto	Viesti kameralta järjestelmälle sisältäen tiedon hyväksytäänkö vai hylätäänkö kappale.
OR - tieto	Overall Result. Kamerajärjestelmän lähettämä tieto tarkastettavan kappaleen hyväksynnästä tai hylkäämisestä.
Scene	Konenäkölaitteiston työkalujen asetusten ryhmä. Erilaisille tarkistuksille luodaan oma scene.
TRIG	Viesti kameralle: kamera päälle.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KONENÄKÖ	4
2.1	Konenäköjärjestelmän osat	5
2.2	Kuvan tuottaminen	5
2.2.1	Objektiivin valinta	5
2.2.2	Kennon koko	9
2.2.3	Lyhin mahdollinen tarkennusetäisyys	10
2.2.4	Kameran resoluution merkitys	11
2.3	Valaistus	12
2.4	Kuvan käsittely	13
2.5	Vikojen etsiminen	13
2.5.1	Hahmon tunnistaminen	14
2.5.2	Pikseleiden laskeminen	14
2.5.3	Epäjatkuvuuksien etsiminen	15
2.5.4	Sävyyn perustuva tunnistus	16
2.6	Konenäköjärjestelmän suunnittelu	17
3	TESTATTAVA TUOTE	19
3.1	Tutkittavat vikatyypit	20
3.2	Värikuvan merkitys vikojen tutkimisessa	25
4	TYÖN KULKU	27
4.1	Tutustuminen laitteistoihin	27
4.2	Testijärjestelyt	27
4.3	Ensimmäinen testi	28
4.3.1	Testin laitteistosta yleisesti	28
4.3.2	Ensimmäisen testin kameralaitteisto	29
4.3.3	Valaistus	30
4.3.4	Kappaleen liikuttaminen	31
4.3.5	Kameran ajoitus ja järjestelmän ohjaus	31
4.3.6	Valaistusolosuhteiden testaaminen	33
4.3.7	Erilaiset olosuhteet erilaisille vioille	33
4.3.8	Esimerkki: halkeaman tunnistaminen laserviivalla	34
4.3.9	Testissä kohdattuja ongelmia	36
4.3.10	Ensimmäisen testin johtopäätöksiä	37
4.4	Toinen ja kolmas testi	38
4.4.1	Toisen ja kolmannen testin laitteisto	38

4.4.2	Kamerat ja objektiivit	39
4.4.3	Suuren tulokulman valaistus	43
4.4.4	Käytetyt työkalut ja suodattimet	45
4.4.5	Kappaleen liikuttaminen ja kohdistaminen	49
4.4.6	Testeissä kohdattuja ongelmia	50
4.4.7	Toisen testin johtopäätöksiä	50
4.5	Tulosten esittely sidosryhmälle	51
5	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	53
5.1	Tiedottamisen onnistuminen	53
5.2	Opinnäytetyön vaikutukset	54
5.3	Johtopäätökset	54
5.4	Mahdollisia lisätutkimuksia	55
	LÄHTEET	56
	KUVAT	
KUVA 1.	Ohuen linssin kaavan graafinen esitys (Azad ym. 2008, 31.)	6
KUVA 2.	Tynnyrivääristymä (vas.) ja neulatyynyvääristymä (oik.)	8
KUVA 3.	C - kiinnityksen kennojen kokostandardi. Tuumakoko osoittaa alkuperäisen kuvaputken halkaisijaa ja numerot vastaavan kennon mittoja millimetreissä (Azad ym. 2008).	9
KUVA 4.	Oleellinen piirre on saatu korostettuna oikeanlaisella valaistuksella. Kohdevalaistus (vas.) ja taustavalaisuus (oik.) (Beijer Electronics 2000)	12
KUVA 5.	Esimerkki harmaasävyrajapinnalla segmentoinnista (Pietikäinen ym. 2013)	13
KUVA 6.	Kameran kuva ja siitä tehtävä tunnistus	15
KUVA 7.	Defect -työkalun toimintaperiaate	16
KUVA 8.	Sisäpuitemallit: (vasemmalta) moderni, skandinaavinen ja perinteinen	19
KUVA 9.	Puuttuva "sormi" sormijatkoksessa	20
KUVA 10.	Pihkatasku profiilivirheellä (selvä ura)	21
KUVA 11.	Pihkatasku pinnan tasossa	21
KUVA 12.	Kuiva oksa	22
KUVA 13.	Ydinjuova	23
KUVA 14.	Halkeama piilossa olevan ydinjuovan yhteydessä	23
KUVA 15.	Kolo materiaalissa	24
KUVA 16.	Sormijatkosvirhe	25
KUVA 17.	Männyn vikojen spektrejä (Kauppinen, 1999)	26
KUVA 18.	Tunnistettava vika ja laserviiva kappaleen pinnassa	34
KUVA 19.	Laserviivan kuvaamista	35
KUVA 20.	Laserviiva konenäkökameralla kuvattuna	36
KUVA 21.	Viiva suodatettuna ja vika tunnistettuna	36
KUVA 22.	Kaikki kamerat käytössä	40

KUVA 23. Kappaleen kuvaus ylhäältä ja sivulta	41
KUVA 24. Telesentrinen linssi hävittää kuvasta perspektiivin	42
KUVA 25. Päätyprofiili kuvattuna ja vertailukuva oikeanlaisesta profiilista	42
KUVA 26. Päätyprofiilin korrelaatio mitattuna. Korrelaatio kuvassa noin 84.	42
KUVA 27. Suuressa kulmassa tuleva valaistus	43
KUVA 28. Valon ja varjon merkitys pinnan muodon tulkitsemisessä kaksiulotteisessa kuvassa (Forsyth ym. 2012, 90)	45
KUVA 29. Esimerkki scenestä ja flow:sta (Omron 2014b)	46
KUVA 30. Kameran kuva vikapaikasta harmaasävynä	47
KUVA 31. Kuva suodatettuna Roberts Cross – suodattimella	47
KUVA 32. Vika löydettyä Precise Defect – työkalulla	48
KUVA 33. Kuvien 30, 31 ja 32 Flow	48

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Tyypillisen konenäköjärjestelmän kehityksen vaiheet (Davies 2004, 820)	18
TAULUKKO 2. Vikojen tunnistaminen eri tekniikoilla ensimmäisessä testissä	30
TAULUKKO 3. Logiikan tulot ja lähdöt	32

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö sai alkunsa, kun tekijä tiedusteli Kivioja Engineering Oy:n (Myöhemmin Kivioja Engineering) Simo-Pekka Kiviojalta aiheutta tuotannon automatisointiprojektin aiheeksi. Tuotannon automatisointiprojekti on tuotantotalouden koulutusohjelmaan kuuluva syventävä ja käytännön taitoja kehittävä opintojakso, jossa pyritään löytämään ratkaisuja teollisuuden aitoihin kehitystarpeisiin. Kivioja osasi osoittaa tekijän Tiivituotteen (myöhemmin Tiivi, osa Inwido Finland Oy:tä) suuntaan ja Osmo Laitilalle. Häneltä löytyi sopiva tutkimuskohde ikkunan sisäpuitteen höyläyksen laaduntarkastamisessa. Tiivi on aiemminkin tehnyt tutkimusta aiheesta ja aiheesta on tehtaan toimeksiannosta tehty myös insinöörityö vuonna 2012 (Kujanpää 2012). Syvällisemmälle tutkimukselle oli kuitenkin aiheutta, koska aiempi tutkimus ei täysin vastannut avoimiin kysymyksiin konenäön käytöstä ikkunatuotannossa.

Tutkittavan aineiston opinnäytetyöhön toimitti Tiivi. Tutkittava ongelma on todellinen ja asiakasyritys on investoimassa vastaavaan teknologiaan vuosien 2014 - 2015 aikana. Opinnäytetyössä oli mukana myös Kivioja Engineering. Kivioja Engineering on toimittanut huomattavan paljon laitteistoja ja koneita Tiiville ja yritysten yhteistyö tuotekehityksessä on tiivistä. Opinnäytetyö on jatkumoa tälle pitkään jatkuneelle yhteistyölle ja onnistuessaan se mahdollistaa Kiviojalle uusia mahdollisuuksia koneissaan ja Tiiville tarpeellisen koneen sisäpuittehöylien purkupäähän. Kivioja Engineering Oy:n yhteyshenkilönä toimi yrittäjä Simo-Pekka Kivioja ja Tiiviltä yhteyshenkilönä toimi kehityspäällikkö Osmo Laitila. Opinnäytetyön ohjaajina Centrialta toimivat Jari Kaarela ja Sakari Pieskä.

Työn tekijällä ei ollut ennen työn aloittamista juurikaan kokemusta konenäöllä tapahtuvasta laadunvarmistamisesta. Aiempi kokemus rajoittuu yhteen testaukseen vanhan, 90-luvulla asennetun, WoodEye¹ – järjestelmän parissa, jolla koetimme löytää höyläämättömistä koivulankuista oksia ja muita vikoja. Tämä kokeilu oli kaupallisesti menestyksetön, mutta kokemuksena avartava ja herätti kiinnostusta aiheeseen.

Muulta osin tekijän aiempi työhistoria tukee tämän tutkimuksen aihetta. Tekijä on työskennellyt höyläämöllä työnjohtotehtävissä sekä koneautomaatiota toimittavan yrityksen asiakaspalvelupäällikkönä. Edellisissä työtehtävissä on opittu paljon höyläyksestä sekä höyläyksessä esiintyvistä virheistä. Lisäksi konetoimituksen prosessi ja vaatimukset ja sopimukset ovat tulleet tutuiksi. Tämän kokemuksen pohjalta on ollut hyvä edetä kohti uutta osaamisaluetta konenäköpohjaisessa laaduntarkastuksessa.

Opinnäytetyön alussa päätettiin projektimaisesta työskentelytavasta ja työlle asetettiin tavoitteet sekä aikataulu. Opinnäytetyö aloitettiin teknologiatutkimuksena automatisointiprojektin puitteissa. Automatisointiprojektin tavoitteena oli selvittää sopivin lähestymistapa ongelmaan ja tutkia alustavasti tarvittavia konenäkötyökaluja. Ensimmäisessä vaiheessa ei tavoitteena ollut varsinaisen koneen suunnittelu. Ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena oli laatia esiselvitys konenäön käyttöönotosta kappaleiden laaduttamiseen. Ensimmäinen vaihe voitaisiin todeta onnistuneeksi, mikäli lopussa olisi tulos, onko käytettävissä olevilla laitteistoilla mahdollista tarkastaa höylättyä tuotteita. Tulos olisi voinut olla myös se, että käytettävissä olevilla laitteistoilla ei olisi ollut mahdollista saada aikaan riittävän luotettavaa tunnistamista.

¹ WoodEye on ruotsalaisen Innovativ Vision AB:n toimittama sahatavaran lajitteluun tarkoitettu konenäköjärjestelmä.

Työn toisessa vaiheessa, johon saatiin käyttöön viimeisin konenäkötekniologia, tutkittiin tarkemmin mitä valmis kone vaatii toimiakseen. Tässä vaiheessa oli etenemissuunta jo valittuna Omronin FH – laitteistolla toteutettavaksi. Toisen vaiheen tavoite olikin löytää tarvittavat valaistusolosuhteet ja laitteiston parametrisointi toimivaan koneeseen. Toisen vaiheen tavoitteena oli tuottaa tietoa tarvittavista valaistusolosuhteista, konenäkölaitteiston työkaluista sekä parametrisoinnista. Enää kyseessä ei ollut enää pelkkä teknologiatutkimus, vaan nyt oli kyseessä empiirinen tutkimus FH – laitteistolla.

Toisen vaiheen tavoitteiden täytyessä saadaan projektin aikana kehitettyä FH – sarjaan pohjautuva tarkastuslaitteisto, mikä saadaan myöhemmin otettua käyttöön osana Tiivin sisäpuutteiden höyläyslinjaa. Opinnäytetyössä ei kehitetä valmiin koneen mekaniikkaa muuta kuin siltä osin, että tutkitaan sopivat kamerakulmat ja etäisyydet sekä valaistuksen yksityiskohdat. Näiden tietojen pohjalta voidaan lähteä kehittämään varsinaista lajittelukonetta ja sen mekaniikkaa.

2 KONENÄKÖ

Termiä konenäkö (*machine vision* tai *computer vision*) tarkoittaa näköaistin imitoimista koneellisin keinoin (Soini 2002). Pelkkä näköaisti ei yksin riitä, vaan lisäksi on ymmärrettävä, mitä nähdään ja miten se poikkeaa normaalitapauksesta. Konenäön piiriin voidaan laskea myös useita ihmissilmän kyvyt ylittäviä tekniikoita. Tällöin puhutaan yleisesti ottaen erilaisista valon aallonpituuksista. Konenäössä voidaan käyttää jopa UV- ja röntgen – luokassa olevia aallonpituuksia. Tässä opinnäytetyössä keskitytään näkyvän valon aallonpituuksilla tehtäviin tunnistuksiin.

Tunnistettavat piirteet voivat liittyä esimerkiksi tuotteen pinnanlaatuun ja sen vaihteluihin, väriin, kiiltävyyteen, muotoon, kokoon tai sijaintiin kyseisessä tutkitavassa kohteessa. Konenäöllä tutkitaan myös pinnan tekstuuriin liittyviä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi puutavaran lajittelussa pinnanlaadun perusteella (Pietikäinen ja Silven 2013, 6-7). On huomionarvoista, että konenäöllä voidaan tutkia myös ihmissilmälle näkymättömiä vikoja, kun käytetään valaistuksessa erikoisempia ratkaisuja. Tällöin voidaan tutkia esimerkiksi UV-spektrissä näkyviä piirteitä. Sahateollisuudessa käytetään usein skannereita, joissa on yhdistettynä useita erilaisia tunnistustekniikoita. Esimerkiksi Weinigin Combiscan järjestelmiin on saatavissa värikamerat sävyyn pohjautuvaan tutkimukseen, linjalaserit muotoa ja kokoa mittaamaan sekä röntgenlaitteet piilovikojen tutkimiseen. Lisäksi samaan laitteeseen voidaan integroida lisäominaisuuksia, kuten kosteudenmittaus ja metallinpaljastin (Weinig group 2015).

2.1 Konenäköjärjestelmän osat

Kuva tuotetaan kameralla tai skannerilla. Nykyisin kamerat ovat digitaalisella kennolla varustettuja, joten AD-muunnosta ei tarvitse tehdä. Kuva siirtyy kameralta keskussyksikölle, mikä prosessoi kuvaa. Markkinoilla on myös älykameroita, joissa prosessointi tapahtuu itse kamerassa ja erillistä keskussyksikköä ei tarvita. Prosessoinnin voi jakaa esiprosessointiin, jossa kuvaa selkeytetään, suodatetaan ja poistetaan siitä epäoleellista tietoa. Tämän jälkeen suoritetaan varsinaiset tunnistusalgoritmit, joilla kuvasta etsitään esiopetettuja tai parametrien mukaisia piirteitä. Lisäksi järjestelmässä on oltava soveltuva valaistus.

2.2 Kuvan tuottaminen

Konenäköjärjestelmässä kuva on tuotettava siten, että se on digitaalisessa muodossa. Nykyään kamerat ovat joko CCD tai CMOS - kennolla varustettuja ja kuva tuotetaan valmiiksi digitaalisessa muodossa. Tässä tutkimuksessa käytettiin Omronin kamerakalustoa. Käytetyt kamerat olivat sekä CCD, että CMOS – kennollisia FH ja FZ-sarjan kameroita. Testattavana oli kahden megapikselin CMOS - kennollinen FH-SC02 ja 0,3 megapikselin CCD – kennollinen FZ-SC. CMOS – kennolliset kamerat tuottavat kuvan nopeammin ja siten ovat käyttökelpoisempia liikkuvaa kohdetta kuvattaessa. (Omron 2014c.)

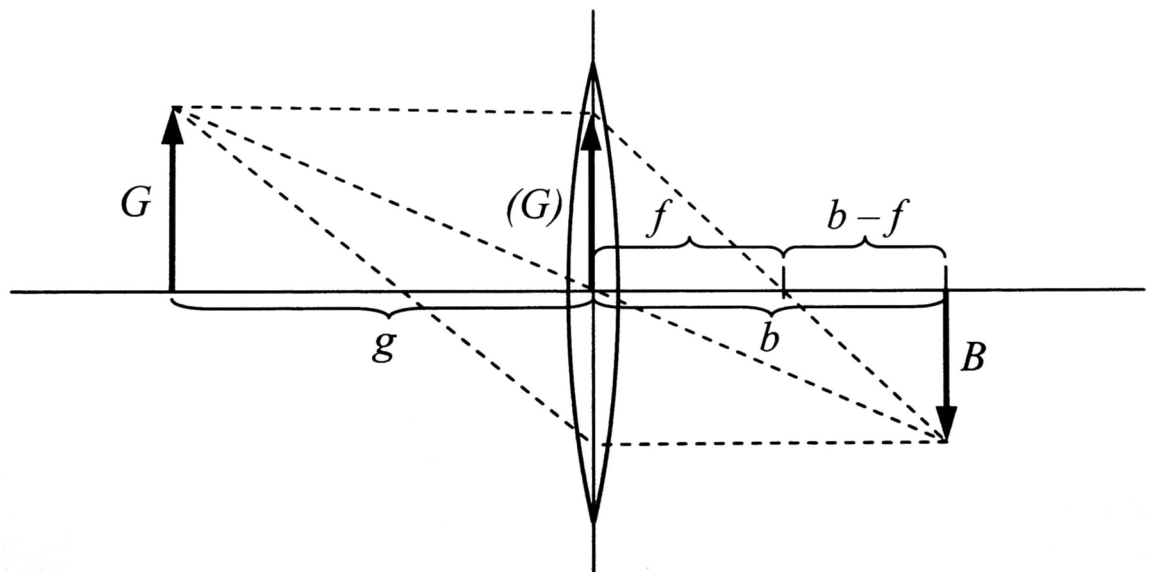
2.2.1 Objektiivin valinta

Sopiva objektiivin polttoväli (f) voidaan yksinkertaistettuna laskea käyttäen ohuen linssin laskentakaavaa². Tällöin on tiedettävä vähintään kohteen koko (G), kohteen

² Thin lens formula. Yksinkertaistettu malli linssistä, jossa oletetaan linssi (tai linssiryhmä) litteäksi ja yksitasoiseksi. Oikean elämän optiikan kanssa kaava ei ole täysin tarkka, mutta suuntaa antava. Tulokset on aina varmistettava käytännössä (Azad, Gockel & Dillmann 2008, 30 - 34).

etäisyys (g) ja kennon koko (B). Muuttujien merkitys selviää oheisesta kuvasta (KUVA 1). (b) on linssin etäisyys kennosta. Tätä tietoa käytetään myöhemmin lähimmän mahdollisen tarkennusetäisyyden laskemiseen. (Azad, Gockel ja Dillmann 2008.)

Forsyth ja Ponce (2012) kiinnittävät kirjassaan huomiota, että ohuen linssin laskenta-kaava ei ole tarkka tosielämän objektiivien kanssa. Tarkempia tuloksia saisi käyttämällä paksun linssin kaavaa, mikä ottaa huomioon linssiryhmän paksuuden H ja H' . Tässä esittämäni laskelmat ovat kuitenkin riittävän tarkkoja likiarvoja, joita voidaan käyttää, kun kameran etäisyys kohteesta on säädettävissä. (Forsyth ym. 2012)



KUVA 1. Ohuen linssin kaavan graafinen esitys (Azad ym. 2008, 31.)

Verranto osoittaa että (KUVA 1):

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b} = \frac{f}{b-f}$$

Descartesin mukainen ohuen linssin laskentakaava:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

Yhdistämällä edelliset kaavat ja sieventämällä saadaan kaava:

$$f = \frac{g \cdot B}{G + B}$$

Tällä kaavalla voidaan laskea tarvittava linssin polttoväli esimerkkitapauksessa. Kaikki yksiköt ovat millimetrejä [mm].

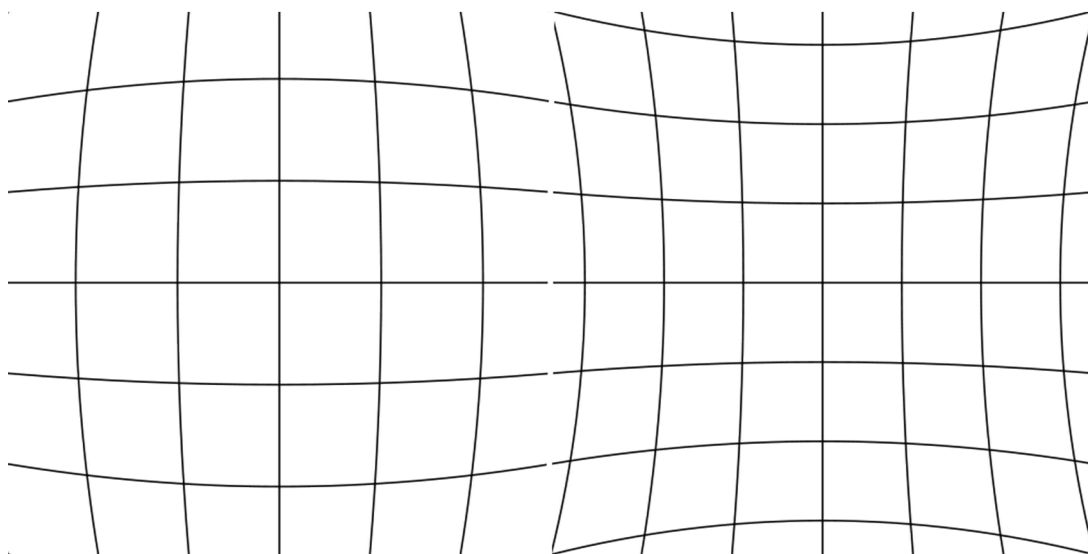
Lasketaan esimerkki tarvittavasta objektiivista, kun käytössä on Omronin kamera FH-SC02, jossa kuvasensorin leveys (B) on 11,26 mm (Omron Industrial Automation 2014a). Tarkastettavan tuotteen vaatima kuva-ala (G) on 60 mm. Päätetään että linssin etäisyys kohteesta (g) halutaan olevan 250 mm. Tällöin saadaan laskettua linssin polttoväli (f):

$$f = \frac{g \cdot B}{G + B} = \frac{250 \text{ mm} \cdot 11,26 \text{ mm}}{60 \text{ mm} + 11,26 \text{ mm}} \approx 39,5 \text{ mm}$$

Objektiivin polttovälillä 39,5 mm antaisi valitulla kameralla 60 mm kuva-alan leveysuunnassa, kun linssin etäisyyden kohteesta on 250 mm. Konenäkösovelluksissa on järkevää käyttää kiinteällä polttovälillä olevia linsejä kustannus- ja kuvanlaatusyistä, joten valitaan seuraava, lyhyemmällä polttovälillä oleva vakio-objektiivin. Tässä tapauksessa se olisi 35 mm. Tällöin Omronin tuotevalikoimasta sopiva objektiivin tähän tilanteeseen olisi esimerkiksi 3Z4S-LE SV-3514H, mikä tarjoaa maksimissaan F 1:1.4 aukon ja se soveltuu maksimissaan 2/3" kennollisille kameroille. Objektiivin valinnassa huomioonotettavia seikkoja on täsmennetty vielä kappalessa 2.2.2.

Valitsemalla lyhyemmän polttovälin objektiivi varmistetaan, että koko kuvattava kohde mahtuu varmasti kuvaan. Lisäksi tällöin saadaan hieman pelivaraa mahdollisesti tarvittavaa loittorengasta varten. Kaava on yksinkertaistus linssistä, joten on hyvä, että epätarkkuutta saadaan kompensoitua. Lyhimmästä mahdollisesta tarkennusetaisyydestä ja mahdollisesti tarvittavista loittorengaista on kerrottu lisää kappaleessa 2.2.3.

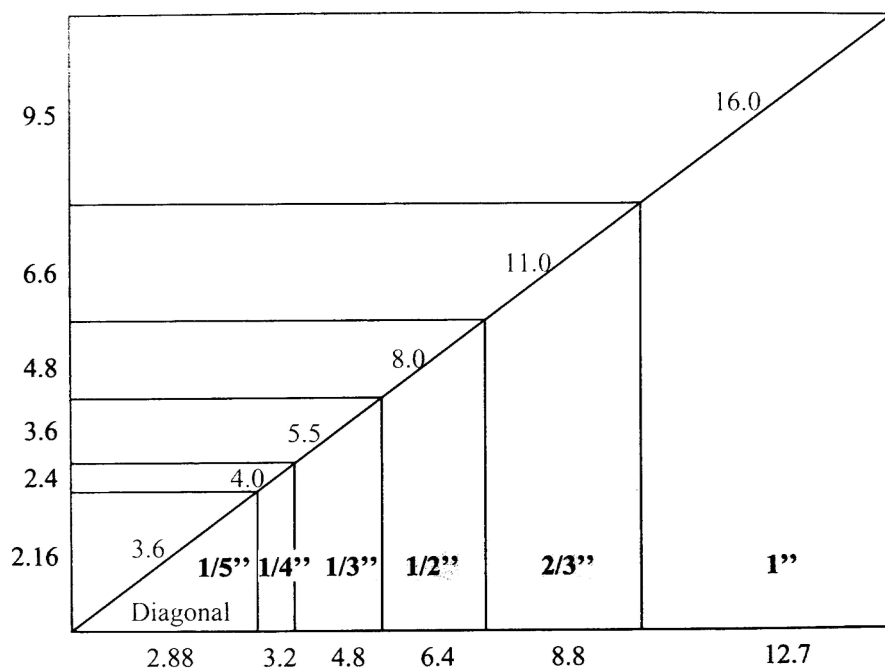
Objektiivin valinnassa myös linssin aiheuttamat vääristymät on otettava huomioon. Objektiivi tuo aina jonkin verran vääristymiä kuvaan. Suurimpina ongelmia konenäön kanssa voivat tulla erilaiset geometriaan liittyvät vääristymät, kuten tynnyrivääristymä (*barrel distortion*) ja neulatyynyvääristymä (*pincushion distortion*) (KUVA 2), jotka ovat haitaksi mitattaessa kuvattavan kappaleen dimensioita. Lisäksi väriin ja sävyihin perustuvissa mittauksissa ongelmiksi voivat tulla kromaattinen vääristymä ja linssin valon läpäisyn tasaisuus verrattuna kuvan keskustaa ja reunaa. Vääristymien syyt liittyvät yleensä linssien valmistustekniikkaan, jolloin linssin polttoväli voi olla hieman erilainen reunassa kuin keskellä ja valon eri aallonpituuksien erilaiseen taittumiseen linssin rajapinnoilla.



KUVA 2. Tynnyrivääristymä (vas.) ja neulatyynyvääristymä (oik.)

2.2.2 Kennon koko

Kennon koko (B) on tarkistettava valmistajan datalehdessä. Alun perin C-kiinnityksessä on käytetty kameran kuvaputken halkaisijaa vastaavia tuumakokoja, mutta nykyisillä digitaalisilla kameroilla tämä ei aina päde. Esimerkiksi testissä käytetyn Omronin FH-SC02 – kameran kennon nimellisleveys on ilmoitettu $2/3''$ kuvaputken mukaan, jolloin se olisi 8,8 mm (KUVA 3). Kuitenkin valmistaja ilmoittaa kennon leveydeksi 11,26 mm. Alkuperäisissä C – kiinnityksen mukaisissa kameroissa kuvasuhde oli 4:3. Nykyaikaisissa konenäkökameroissa kuvasuhde on tapauskohtainen, minkä johdosta kuvan 3 ilmoittamiin leveyksiin on suhtauduttava varauksella.



KUVA 3. C - kiinnityksen kennojen kokostandardi. Tuumakoko osoittaa alkuperäisen kuvaputken halkaisijaa ja numerot vastaavan kennon mittoja millimetreissä (Azad ym. 2008).

Objektiivin valinnassa on lisäksi huomioitava, että objektiivi on suunniteltu riittävän suurelle kennolle. Yleisesti käytetyt 1/4" koolle soveltuvat objektiivit eivät sovellu suuremmille esim. 2/3" kameroille. Käytettäessä pienemmälle kennolle suunniteltua linssiä voi edessä olla useita ongelmia. On mahdollista, että kuvan reunoista osa jää kokonaan mustaksi tai että linssin piirtokyky ei riitä reunoille ja kuva on reunoiltaan epäterävä. (Azad ym. 2008.)

2.2.3 Lyhin mahdollinen tarkennusetäisyys

Konenäkösovelluksissa joudutaan kuva-ala usein rajaamaan erittäin pieneksi, jotta tarkasteltavasta kohteesta saataisiin riittävän tarkka kuva. Tällöin saatetaan törmätä ongelmaan, että linssin suunniteltu lyhin tarkennusetäisyys MOD^3 on pidempi, kuin etäisyys kappaleesta. Tällöin voidaan avuksi ottaa loittorengaat, joilla tarkennusetäisyyttä saadaan lyhennettyä. On kuitenkin huomioitava, että samalla myös kuva-ala muuttuu hieman.

Kokemukseni mukaan linssien ilmoitettu MOD ei aina ole aivan tarkka. Tällöin laskennallinen lähestymistapa ei myöskään ole erityisen tarkka. Laskemalla voidaan kuitenkin saada suuntaa-antavia tuloksia. Käytännössä nämä tulokset on kuitenkin testattava todellisissa olosuhteissa. Tällöin on hyvä olla saatavilla loittorengassarja, jolla linssin etäisyyttä kamerasta voidaan testata useilla eri asetuksilla ja valita käyttökohteeseen parhaiten toimiva paksuus.

Loittorengaan paksuus (d) voidaan laskea ohuen linssin laskentakaavoilla, kun tiedetään MOD (g) ja uusi MOD (g') sekä objektiivin polttovälin (f). Lasketaan aiemmin esitetylle 35 mm polttoväliselle objektiiville tarvittava loittorengas, jos objektiivi haluttaisiin sijoittaa 150 mm päähän kuvattavasta kohteesta. Objektiivin

³ MOD = Minimum Object Distance, Lyhin mahdollinen tarkennusetäisyys

MOD on valmistajan mukaan 250 mm. Alla olevalla kaavalla laskemalla saadaan tarvittavan loittorenkaan paksuudeksi 5 mm.

$$d = \frac{f \cdot g}{f - g} - \frac{f \cdot g'}{f - g'}$$

$$\frac{35 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm}}{35 \text{ mm} - 250 \text{ mm}} - \frac{35 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm}}{35 \text{ mm} - 150 \text{ mm}} \approx 5 \text{ mm}$$

2.2.4 Kameran resoluution merkitys

Konenäkökameroiden resoluutio vaihtelee kirjoitushetkellä halpojen antureiden 240x160 pikselistä aina kymmeneen megapikseliin asti. Resoluution kasvaessa kameran erottelukyky kasvaa (Soini 2002), kunhan objektiivin piirtokyky on riittävän hyvä. Suurta erottelukykyä tarvitaan kohteissa, joissa kuva-ala joudutaan kasvattamaan suureksi tai kun kuvasta tarvitsee tehdä tarkkoja mittauksia. Pienemmällä resoluutiolla pärjää kohteissa, joissa kuvataan jotain tiettyä detaljia esimerkiksi tarkastettaessa jonkin komponentin tyyppi ja asennuksen oikeellisuus. Tällaisen tarkastuksen pystyy rakentamaan pienen resoluution kameralla ja makrolinssillä sekä laitteistolla, joka kohdistaa piirilevyn aina samaan kohtaan ja kuva-ala ei ole muuta kuin tämä kyseinen komponentti. Suurta resoluutiota tarvittaisiin taas vastaavasti, jos kuvattaisiin koko piirilevy kerralla ja yhdestä kuvasta tarkastettaisiin useita komponentteja samalta piirilevyltä.

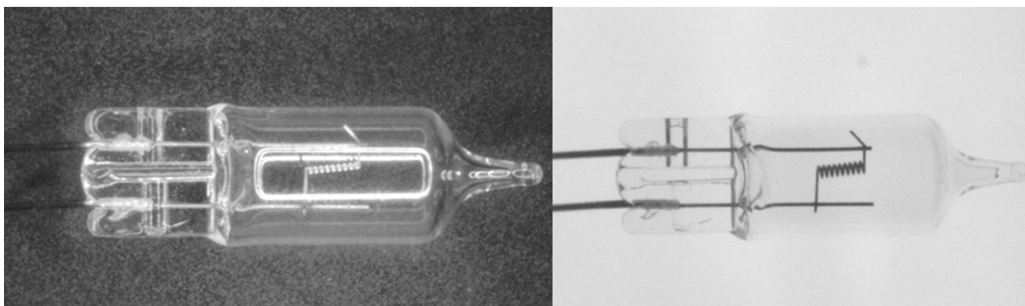
Suuri resoluutio voi aiheuttaa myös ongelmia. Kuvan pikselimäärän kasvaessa kasvaa myös kuvan ottamiseen ja siirtämiseen tarvittava aika. Lisäksi suuri-resoluutioisella kuvalla kasvaa myös prosessointiaika. Mitä enemmän kuvassa on informaatiota, sitä raskaampi konenäköjärjestelmästä tulee ja sitä pidemmäksi kasvaa laitteiston kiertoaika. Myös järjestelmän hinta kasvaa huomattavasti käytettäessä korkearesoluutioisia kameroita. Lähtökohtaisesti kannattaa käyttää mah-

dollisimman pieniä resoluutioita, kunhan erottelukyky on riittävä tarkastettavaan ongelmaan.

2.3 Valaistus

Valaistus on konenäön onnistumisessa kriittisessä roolissa. Ilman kunnollista ja hallittua valaistusta on mahdotonta saada luotettavia tuloksia konenäöllä (Beijer Electronics 2000). Valaistuksella voidaan korostaa tutkittavaa piirrettä ja häivyttää epäoleellisia seikkoja kohteesta. Valaistuksen on oltava muuttumatonta ja kuvattava kohde on suojattava hajavalolta, kuten auringonpaisteelta (Soini 2002). Kuvattaessa liikkuvaa kohdetta, voidaan valaistuksella pysäyttää liike kuvan ottoa varten. Tällöin valaisimen täytyy olla tahdistettu tarkasti kameran kanssa ja valopulssin on oltava erittäin tarkasti samanmittainen jokaisen kuvan kohdalla.

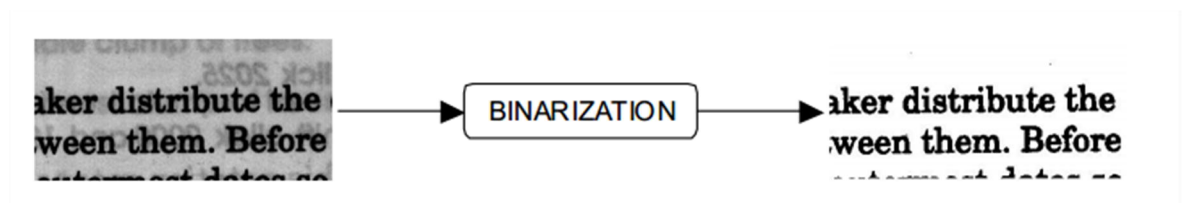
Valaistuksen tyyppejä ovat mm. suora kohdevalo, rengasvalo, taustavallo, rajattu taustavallo (*dark field*), pienikulmainen valaistus, diffusoiva kupoli, polarisoitu valo, laser-valo sekä akselinsuuntainen valo (Omron 2001). Valaistuksen suunnittelu vaatii huomattavan paljon testaamista ja käytännön kokemusta erilaisista valaisutekniikoista. Erilaisilla valaistuksilla on mahdollista saada esille piirteitä, jotka olisivat vallitsevassa valaistuksessa mahdottomia havaita (KUVA 4).



KUVA 4. Oleellinen piirre on saatu korostettuna oikeanlaisella valaistuksella. Kohdevalaistus (vas.) ja taustavalistus (oik.) (Beijer Electronics 2000)

2.4 Kuvan käsittely

Konenäkölaitteistojen ohjelmistot sisältävät lukuisia työkaluja, jotka liittyvät otetun kuvan käsittelyyn ja selkeyttämiseen. Kuvien käsittelyllä voidaan parantaa etsittävän piirteen erottumista kuvasta tai sillä voidaan nopeuttaa tarkastusta vähentämällä kuvasta kohinaa ja turhaa informaatiota. Tyypillisiä toimenpiteitä on kuvan kontrastin lisääminen ja segmentointi (*binarization*) (KUVA 5). Tämä tehdään asettamalla harmaasävykynnys, jota tummemmat pikselit muutetaan mustiksi ja vaaleammat valkoisiksi. Segmentoinnissa kuvasta tehdään kaksivärinen ilman harmaan sävyjä. Tällöin mm. merkkien tunnistaminen kuvasta helpottuu (Pietikäinen ja Silven 2013). Kuvan käsittely tapahtuu joko älykamerassa tai keskusyksikössä, riippuen laitteiston tyypistä.



KUVA 5. Esimerkki harmaasävyraja- ja segmentoinnilla (Pietikäinen ym. 2013)

2.5 Vikojen etsiminen

Pietikäisen ja Silvenin (2013) mukaan vian etsimiseen konenäöllä on kaksi lähestymistapaa. Ensimmäinen on tapa, jossa koneelle opetetaan virheelliset tapaukset ja kone etsii vastaavia piirteitä kuvasta. Toisessa tavassa koneelle asetetaan parametrit, joilla vikoja etsitään. Ensimmäiseksi mainittu tapa perustuu hahmon tunnistukseen ja toinen tapa yleensä pikseleiden laskemiseen käsitellystä kuvasta

(Gravity and Area) tai epäjatkuvuuksien ja muutosten etsimistä tasaiselta pinnalta (Defect ja Precise Defect).

2.5.1 Hahmon tunnistaminen

Hahmon tunnistamisessa työkalulle opetetaan referenssi. Tätä referenssiä verrataan jokaisessa kuvassa olevaan piirteeseen ja kone laskee näiden välisen korrelaatioarvon. Korrelaation ollessa 100, vastaa testattavan kuvan piirre täysin referenssitapausta. Laitteiston suunnittelija asettaa korrelaatioarvon raja-arvon, jonka alle olevat näytteet hylätään. Useissa työkaluissa voidaan asettaa monta etsittävää piirrettä, jolloin samankaltaisesta optimitapauksesta voi olla varianssia tai vaihtoehtoisesti työkalua voidaan käyttää lajittelemaan erilaisia kohteita esimerkiksi liukuhihnalta.

Omronin laitteistoilla hahmontunnistustyökalut ovat Search-työkaluja. FH-sarjassa näitä on tarjolla seitsemän erilaista. Eri työkalut soveltuvat erilaisiin käyttökohteisiin. Esimerkiksi perus Search-työkalu on käyttökelpoinen, kun etsitään esimerkiksi kohdistuskuviota piirilevyn nurkasta. Työkalu antaa tiedoksi löydetyn kuvion korrelaatioarvon, sijainnin sekä kulman (Omron 2014d, 68-155). Search-työkaluja voidaan käyttää myös, kun halutaan tunnistaa mahdolliset muotovirheet tai vieraat esineet kuvassa. Nämä molemmat laskevat korrelaatioarvoa. Samaa kategoriaan kuuluvat myös etiketin tarkastukseen käytettävä Fine Matching (Omron 2014d, 339-349) sekä tekstiä mallikirjaston avulla lukeva Character Inspection (Omron 2014d, 350-359).

2.5.2 Pikseleiden laskeminen

Pikseleiden laskemiseen perustuvat tarkastusmenetelmät ovat parametrisia keinoja rakentaa laaduntarkastus. Tämä edellyttää sitä, että kuvasta on muokattu pois

kaikki muu paitsi vikapaikka. Kuvankäsittelytyökaluilla kuvaa on muokattava siten, että ainoastaan mahdollinen vika jää kuvaan näkyville muokkausten jälkeen (KUVA 6). Työkalun parametreihin voidaan asettaa raja, jonka ylittyessä työkalu tunnistaa vian.

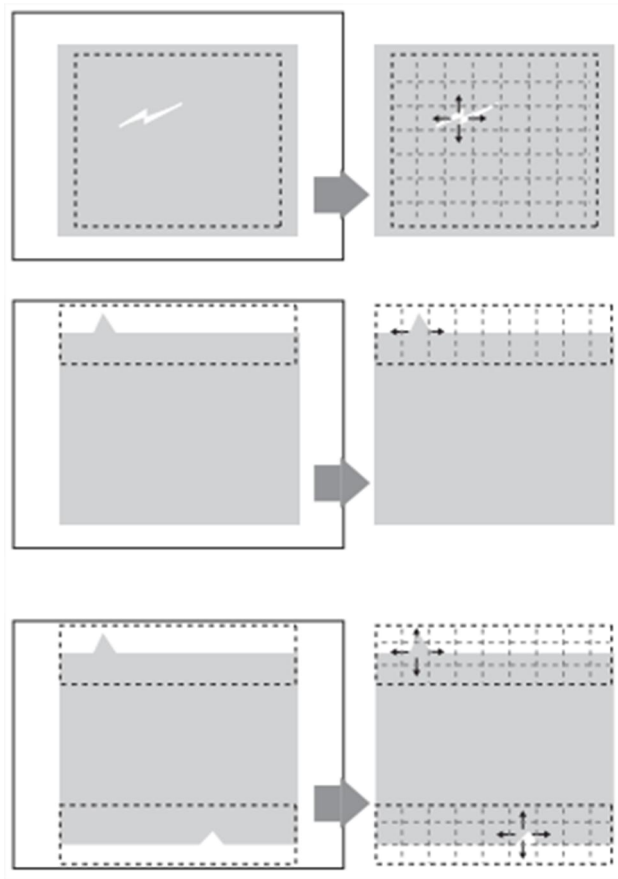


KUVA 6. Kameran kuva ja siitä tehtävä tunnistus

Omronin Xpectia –sarjan konenäkölaitteissa tämän kategorian viantunnistustyökalu on Gravity and Area –työkalu (Omron 2014d). Värikuvalla Gravity and Area voi poimia myös kuvasta väriin perustuvia virheitä.

2.5.3 Epäjatkuvuuksien etsiminen

Useissa konenäkölaitteistoissa on valmiita työkaluja vikojen ja epäjatkuvuuksien etsimisiin. Ne voivat olla johonkin spesifiseen kohteeseen, kuten liimanauhan yhtenäisyyden tarkastukseen suunniteltuja. Omronilla on konenäkölaitteistoissaan Defect -työkalu, joka etsii poikkeamia kuvasta epäjatkuvuuksien avulla (KUVA 7). Kyseistä työkalua voisi käyttää esimerkiksi naarmun etsimiseen maalipinnasta tai työstövirheiden ja lohkeamien etsimiseen valmiin kappaleen särmästä.



KUVA 7. Defect -työkalun toimintaperiaate

FH –sarjan Xpectia -koneenäkölaitteissa on uutena työkaluna Precise Defect, mikä on kehittyneempi versio Defect työkalusta. Siinä on mahdollista hienosäätää epä-jatkuvuuskohtien tunnistusta. Enemmän tästä työkalusta voi lukea kappaleesta 4.4.4.

2.5.4 Sävyyn perustuva tunnistus

Nykyaikaisilla värikameroilla on mahdollista tutkia myös piirteitä, jotka vaativat täsmällistä väridataa kohteesta. Tällaisia kohteita voivat olla esimerkiksi tavarajajittelu väritäplän perusteella tai esimerkiksi hedelmien kypsyysasteen määrittely. Sopivia työkaluja Omronin FH-sarjasta löytyy muun muassa Color Data ja

Gravity and Area. Color Datalla voidaan tutkia kappaleita värin perusteella tyyliin: onko määritellyn alueen väri punainen (RGB väriavaruudessa). Gravity and Area – työkalulla voi värikameran kanssa asettaa RGB-väriavaruudesta alueita, joita työkalu etsii ja tarkastaa. Mikäli kuvasta löytyy ennalta asetettuja värejä, ilmoittaa työkalu alueen pinta-alan pikseleinä ja sen gravitaatiokeskipisteen. Näillä arvoilla voidaan hylätä tai hyväksyä kappale tai vaikka ohjata robottia tietyn värisellä täplällä tai laservalolla. (Omron 2014d, 270-294.)

2.6 Konenäköjärjestelmän suunnittelu

Konenäköjärjestelmän suunnittelu ei ole lineaarinen ja puhtaasti tieteellinen prosessi. Se sisältää useita lähestymistapoja ja seurattavia polkuja. On myös hyväksyttävä tosiasia, että kaikki testattavat polut eivät johda tyydyttävään tai edes välttävään ratkaisuun. Konenäköjärjestelmän suunnittelu voi kariutua järjestelmän liian korkeaan hintaan tai järjestelmän riittämättömään nopeuteen järkevillä resursseilla. Lisäksi ongelmana voi olla se, että kaikkia vikoja ei vain saada tunnistettua riittävällä tarkkuudella. (Davies 2004.)

Taulukko 1 kuvaa tyypillistä prosessia, joka käydään läpi konenäköjärjestelmän kehityksessä. Näiden vaiheiden lisäksi kokemuksen mukaan tarvitaan kattavaa valaistuksen testausta, mitä ei ole erikseen listattu työvaiheisiin. Työkalujen ja algoritmien testauksessa on erittäin tärkeää ymmärtää valaistuksen merkitys kokonaisuuden kannalta. Nämä työvaiheet ovat käytännössä yhtäaikaisia. Opinnäytetyössä on päästy taulukon vaiheeseen 19. Konenäön vaatimat laitteistot ovat tiedossa, mutta kappaleenkäsittelyä lopulliseen laitteistoon ei ole vielä tässä vaiheessa suunnittelu.

TAULUKKO 1. Tyypillisen konenäköjärjestelmän kehityksen vaiheet (Davies 2004, 820)

1	Ongelma tulee tietoon (asiakaskontakti)
2	Tilanteen analysointi
3	Olemassa olevan datan tutkiminen
4	Ilmiselvien työkalujen (algoritmien) testaaminen
5	Rajoitteiden ymmärtäminen
6	Työkalujen (algoritmien) jatkokehitys
7	Etsitään ja löydetään asioita, jotka ovat vaikeita tai mahdottomia ratkaista konenäöllä
8	Koetetaan löytää teoria rajoitusten syistä
9	Lisää testausta
10	Saadaan aikaiseksi kehittyneempi lähestymistapa
11	Lähtötietojen uudelleenarviointi
12	Päätetään, jatketaanko eteenpäin
13	Konenäön ohjelmisto valmistuu
14	Arvioidaan nopeusrajoitukset
15	Aloitetaan alusta, mikäli tarpeellista
16	Nopeutetaan ohjelmistoa
17	Saavutetaan järkevä ratkaisu
18	Testataan 1000 kuvalla
19	Suunnitellaan laitteiston rautapuoli
20	Parannetaan ohjelmistoa tarvittaessa
21	Testataan lisää 100000 kuvalla
22	Arvioidaan harvinaisten ongelmien tuomat vaikeudet
23	Arvioidaan ajoituksen tuomat ongelmat
24	Vahvistetaan lopullinen järjestelmä

3 TESTATTAVA TUOTE

Tarkasteltavina kohteina ovat Tiivin sisäpuiteprofiilit (KUVA 8). Näitä on tuotannossa kolmea mallia. Sisäpuiteprofiilin materiaali on sormijatkettua mäntyä. Aihiot toimitetaan kuusi metriä pitkinä ja tehtaassa on oma sormijatkoslinja, jolla pitkät aihiot liitetään päittäin. Materiaalihukka on erittäin vähäistä oman sormijatkoksen ansiosta.

Materiaali on melko haasteellista konenäön näkökulmasta. Konenäön suurimmat ongelmat liittyvät kohinainformaatioon ja kuvattavan kappaleen laatuvaihteluihin. Kuvattavan materiaalin ollessa puuta, sen tekstuuri voi vaihdella erittäin paljon, ollen silti täysin hyväksyttävissä rajoissa. Davies (2004) toteaa kirjassaan, että kirjan kirjoittamisen aikaan puun konenäkö tutkimus on ollut lapsenkengissä verrattuna muihin materiaaleihin. Syyksi hän mainitsee tutkimusalan erityisen haastavuuden. (Davies 2004, 643)

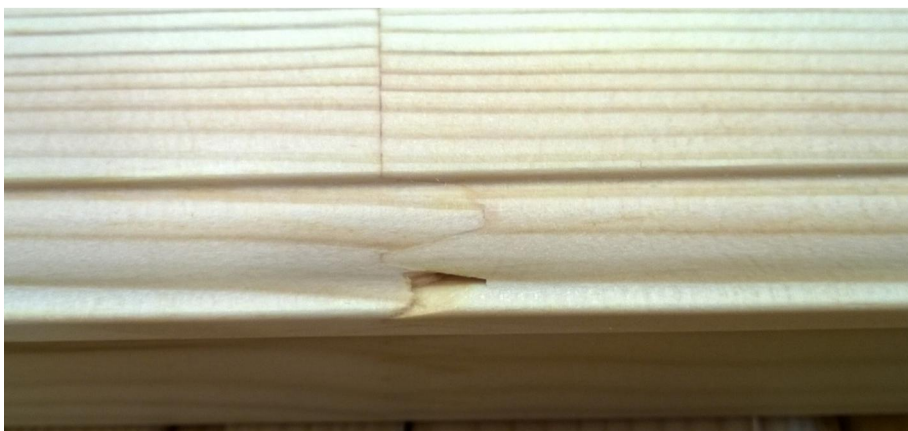


KUVA 8. Sisäpuitemallit: (vasemmalta) moderni, skandinaavinen ja perinteinen

3.1 Tutkittavat vikatyypit

Koekappaleissa oli edustettuna kaikki yleisimmät vikatyypit, joita esiintyy höylätyssä tuotteessa. Vian syynä harvemmin on itse höyläys, vaan viat ovat olemassa jo materiaalissa. Toinen yleinen vian syntypaikka on sormijatkos, mikä ei sinänsä ole materiaalin vika, vaan materiaalin prosessissa oleva virhe. Joka tapauksessa, höyläyksen jälkeen tarvitaan 100 % tarkastus (laatuportti), koska vian pääseminen prosessissa eteenpäin aiheuttaa suuria kustannuksia myöhemmin. Pahimmassa tapauksessa vika pääsee asiakkaalle asti ja se voi johtaa kalliisiin korjaustoimenpiteisiin.

Tämä opinnäytetyö ei sinänsä pyri parantamaan tuotantoprosessin laatua asiakkaalla, vaan tavoitteena on poimia pois vialliset. Vastaava laitteisto toimii toki mainiona työkaluna, kun prosessia kehitetään tulevaisuudessa. Hallittu tietojen kerääminen prosessin lopputuloksesta on tärkeätä, jotta voidaan tulevaisuudessa etsiä vikojen juurisyitä tilastopohjaisin menetelmin, kuten FMEA. FMEA:ssa on merkittävää, että puututaan prosessissa oleviin todellisiin vikoihin sen sijaan, että lähdetäisiin korjailemaan prosessin satunnaisia vaihteluita (FMEA-FMECA.com 2014).



KUVA 9. Puuttuva "sormi" sormijatkoksessa

Puuttuva "sormi" on sormijatkoksen virhe (KUVA 9). Kyseinen vika on hankalasti havaittavissa yläpuolisella visuaalisella tarkastuksella, koska ylhäältä päin katsoen on hankala saada sävyeroa tai kontrastia riittävästi luotettavaan tunnistamiseen. Tämän vian tutkimisessa voidaan käyttää profiilinmittausta esimerkiksi laserjuovan avulla. Toisessa ja kolmannessa testisessiossa käytössä oli kuvaus myös kapaleen sivuilta, jolloin vika näkyy mustana täplänä.



KUVA 10. Pihkatasku profiilivirheellä (selvä ura)



KUVA 11. Pihkatasku pinnan tasossa

Pihkataskua on kahta perustyyppiä. Pihkatasku saattaa jättää höyläyksen jälkeen selvän uran (KUVA 10) tai se saattaa jäädä pinnan tasoon (KUVA 11). Pihkatasku

tulee usein esiin vasta höyläyksessä ja niitä on mahdoton eliminoida 100 % varmuudella materiaalista ennen lopullista profiloitihöyläystä.

Pihkatasku aiheuttaa ongelmia pitkällä aikajänteellä. Kuvan 11 tyyppinen pihkatasku voi olla maalattuna tehtaalta lähtiessä vielä siistin näköinen. Ongelma syntyy ajan kanssa, kun pihka pyrkii läpi maalipinnasta ja pahimmassa tapauksessa pihka saattaa lämpimässä sisäilmassa ruveta valumaan taskusta. Tällaisessa tilanteessa edessä on kallis reklamaatio ja valmiin ikkunan vaihto.



KUVA 12. Kuiva oksa

Oksat voivat olla joko kuivia (KUVA 12) tai terveitä. Terve oksa saattaa pysyä muodossaan, mutta silläkin on taipumus ajan kanssa tulla näkyviin maalin alta. Männyn oksa on aina pihkainen ja sillä on myös taipumus valuttaa pihkaa lämpimässä sisäilmassa. Oksan pihka nousee esiin maalipinnan alta, vaikkei se varsinaisesti valuisikaan. Tämä aiheuttaa tummentuneen läiskän maalipintaan ajan saatossa.



KUVA 13. Ydinjuova

Ydinjuova aiheuttaa maalipintaan kiiltovirheen (KUVA 13). Ydinjuova on pehmeämpi kuin terve puu ja se jää väistämättä näkyviin maalipinnan alta.



KUVA 14. Halkeama piilossa olevan ydinjuovan yhteydessä

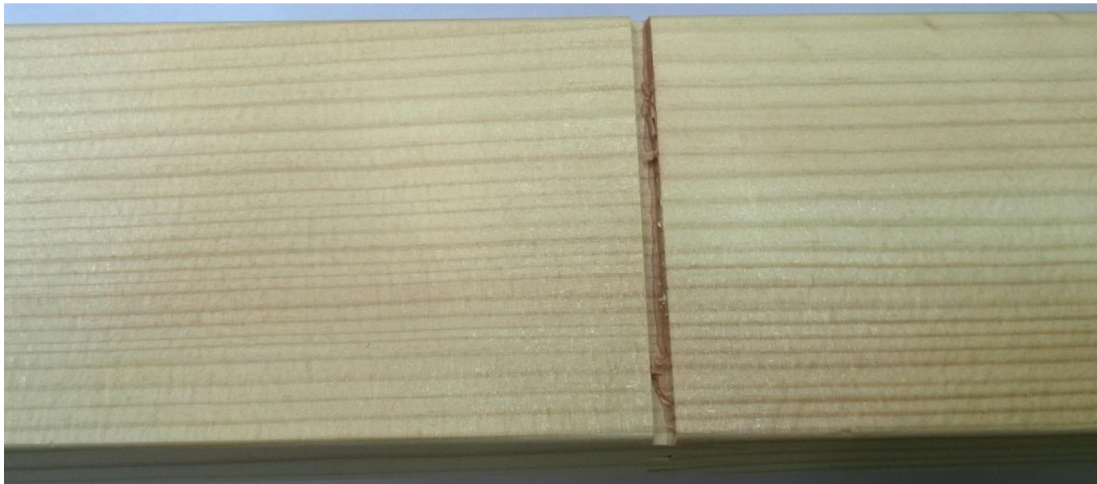
Halkeamat aiheuttavat ongelmia maalauksessa. Pienikin halkeama tulee näkyviin maalipinnassa ensimmäisen vuoden aikana ikkunan asennuksen jälkeen. Halkeama esiintyy usein ydinjuovan tuntumassa, vaikka varsinainen ydinjuova jäisi puun sisään ja olisi muuten piiloon jäävänä sallittu (KUVA 14).

Halkeaman tunnistamisessa ongelmana on, että niistä on erittäin vaikeaa saada luotettavaa tunnistusta pelkästään visuaalisella tarkastelulla. Pienen halkeaman aiheuttama kontrastiero on huomattavasti pienempi, kuin terveen puun syyvaihtelu suurimmillaan. Kyseinen vikatyyppe aiheutti erittäin paljon työtä tutkimuksessa.



KUVA 15. Kolo materiaalissa

Toisinaan raaka-aineessa on virheellisestä käsittelystä tai prosessin aiemmissa vaiheissa tulleita koloja, jotka eivät poistukaan höyläyksessä (KUVA 15). Tällaisen vian aiheuttama virhe on ilmeinen valmiissa tuotteessa.



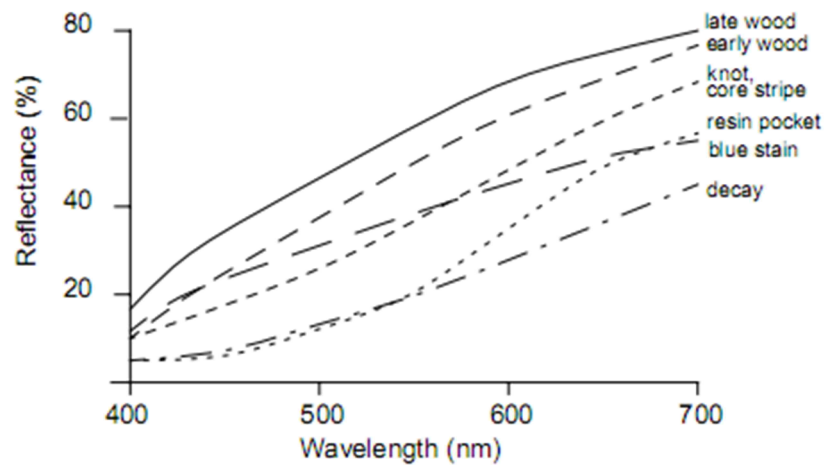
KUVA 16. Sormijatkosvirhe

Kuvassa 16 näkyy ilmeinen sormijatkosvirhe. Tämä vika syntyy aiemmissa jalostusprosesseissa.

3.2 Värikuvan merkitys vikojen tutkimisessa

Värikuvan käyttöä puun vikojen tunnistamisessa on tutkittu aiemmin. Kauppinen (1999) on todennut väitöskirjassaan, että erityisesti infrapunaa lähestyvillä aallonpituuksilla on suuri merkitys puun laadun tarkkailussa. Lisäksi on todettu, että merkittävimmät puun vikojen spektrialueet ovat ihmissilmän näkökyvyn alueella. Tämä on myös sopiva spektrialue värikameroille (KUVA 17). Aiemmin ongelmana on ollut värikuvauksen ja värikuvien analysoinnin vaatima suuri prosessointiteho. (Kauppinen 1999, 40-41.)

Omassa tutkimuksessani totesin, että FH – järjestelmän prosessointiteho on riittävän korkealla tasolla, jotta väridata voidaan käyttää luotettavasti vikojen tunnistamiseen. Väridatan käyttäminen ja sen erottelu kuvasta hidastaa edelleen kiertoaikaa huomattavasti, mutta se on jo hallittavalla tasolla.



KUVA 17. Männyn vikojen spektrejä (Kauppinen, 1999)

4 TYÖN KULKU

4.1 Tutustuminen laitteistoihin

Projektin käytännön työ aloitettiin tutustumalla Omronin FQ-M –sarjan kameraan ja Sysmac Studio –ohjelmistoon. Samalla päästiin tutustumaan NJ-sarjan koneenohjaimeen ja EtherCAT –väylän käyttämiseen kommunikaatiossa. Kivioja Engineering käyttää koneissaan pääasiallisena koneenohjaimena Omronin NJ –sarjaa ja koneiden kenttäväylänä EtherCAT:ia. Tämän takia FQ-M oli looginen laitevalinta ensimmäisiin kokeiluihin. FQ-M:n kanssa testattiin noin viikon verran ja se todettiin ominaisuuksiltaan riittämättömiksi projektin tarpeisiin. FQ-M on älykamera, jonka pääasiallinen käyttökohde on poimi- ja aseta tyyppiset sovellukset esimerkiksi robotinohjaukseen. Siitä puuttuvat tarpeelliset suodatustoiminnot sekä vianhakutoiminnot.

Seuraavaksi otettiin käsittelyyn Omronin Xpectia – sarjan FZ2 – kameralaitteisto. FZ2 tarjoaa monipuolisemman kirjon työkaluja erilaisiin laaduntarkastustarpeisiin. Lisäksi siinä on monipuoliset kuvankäsittelymahdollisuudet, jolla tunnistusta voidaan helpottaa ja kiertoaikaa saadaan lyhennettyä. Ensimmäinen testilaitteisto, jossa päästiin tutkimaan varsinaisia testikappaleita, toteutettiin FZ2 – laitteistolla. Tästä kerrotaan enemmän luvussa 4.3.

4.2 Testijärjestelyt

Testaukset suoritettiin kolmessa vaiheessa. Ensimmäinen vaihe toteutettiin osana automatisointiprojektia ja tällöin aiheena oli tehdä esiselvitys aiheesta ja tutkia

konenäön mahdollisuuksia kohteessa yleisesti. Tässä vaiheessa ei tarkoituksena ollut saada aikaan valmista konetta, vaan laatia teknologiatutkimus aiheesta silloin käytettävissä olevilla laitteistoilla. Ensimmäisen testin tuloksia esiteltiin yleisölle Centrian pintakäsittelyseminaarin yhteydessä. Osallistujina oli alueen puutuotesektorin yritysedustajia ja Centria-ammattikorkeakoulun edustajia. Samassa tilaisuudessa työn ensimmäisen vaiheen tuloksia esiteltiin myös projektin sidosryhmälle. Vastaanotto oli innostunut ja esityksen aiheuttama mielenkiinto antoi aihetta jatkotutkimuksiin.

Toiseen vaiheeseen saatiin lainaksi Suomen Omronilta Xpectia FH - laitteisto. Tässä testissä tehtiin jo varsinaisia tuloksia kohti valmista konetta. Testissä kävi ilmi, että FH:n kehittyneemmät työkalut ja lisääntynyt laskentateho mahdollistaa useita asioita, jotka FZ2:lla olivat mahdottomia. Myös kolmannessa vaiheessa oli käytössä maahantuojaalta lainattu FH - kalusto. Tämän testin yhteydessä laitteiston toimintaa esiteltiin myös loppuasiakkaalle.

4.3 Ensimmäinen testi

Testin aluksi tekijä joutui opettelemaan konenäön perusperiaatteita yleisesti ja samaan aikaan sijoittunut Centrian konenäkökurssi oli suurena tukena ja innostuksena aiheeseen. Konenäkökurssilla oli opittu jo perusteita konenäöstä yleisesti ja kameralaitteistojen käyttöliittymät sekä työkalut olivat tuoreessa muistissa.

4.3.1 Testin laitteistosta yleisesti

Demolaitteiston suunnittelu oli iteratiivinen prosessi. Aluksi se käsitti ainoastaan kameralaitteiston sekä muunneltavan valaistuksen. Työn edetessä alkoi tekijälle valjeta laitteiston todellisia vaatimuksia ja sitä myöten lopullinen laitteisto sai muotonsa. Testin lopullinen laitteisto käsittää neljä pääkomponenttia: kameralait-

teiston, valaistuksen, kappaleen liikuttamisen ja kamerasynkronoinnin/järjestelmän ohjauksen.

Laitteiston käyttäminen oli sinänsä yksinkertaista. Se vaati käyttäjältä vihreän ”Käynnistä” -napin painamista, joka käynnisti kuljettimen ja sen jälkeen laitteisto oli valmis ottamaan kappaleita vastaan. Kameralaitteiston oli oltava joko RUN -tilassa tai ADJUST -tilassa ja ”Output” -valinta valittuna, jotta kamera antoi NG -palautteen ohjaavalle logiikalle.

4.3.2 Ensimmäisen testin kameralaitteisto

Kameralaitteistona toimi Omron FZ2-505-10 kahdella 0,3 megapikselin värikameralla. Käytetyt optiikat olivat C-kiinnitteisiä 16 mm ja 8,5 mm polttoväleillä ja F 1.4 aukollisia. Lisäksi 16mm optiikan kanssa oli käytössä 1mm loittorengas ja 8,5 mm optiikan kanssa oli käytössä 0,5 mm loittorengas. Loittorenkaita tarvittiin, jotta optiikat saatiin tarkennettua riittävän lähelle ja kameroiden näkökentät olisivat optimaaliset kuvattavaan kohteeseen.

Kameralaitteisto on Omronin Xpectia -sarjasta, mikä on tarkoitettu laaduntarkastukseen useille eri teollisuudenaloille. Kyseinen FZ2 -laitteisto on peräisin vuodelta 2007. Laitteistossa on työkaluja kuvan muokkaamiseen sekä vikojen tunnistamiseen. Kyseisessä laitteistossa on tulot ja lähdöt sekä sarja- että rinnakkaismuotoiseen tiedonsiirtoon. Tällä kertaa kätevinä oli käyttää rinnakkaisporttia tiedonsiirtoon ohjaavan logiikan ja kameran keskusyksikön välillä. Sarjaportilla pystytään lähettämään numeerisia viestejä, kuten koordinaatteja tai kappaleen mittatietoja.

4.3.3 Valaistus

Onnistuneen konenäön edellytys on hallittu ja tarkoituksenmukainen valaistus, jotta vikojen tunnistaminen olisi mahdollista ja luotettavaa. Tässä testisessiossa päädyttiin käyttämään kahdenlaisia valaistusolosuhteita eri vikojen tunnistukseen. Eri vikatyypit ja niiden vaatimat tekniikat on listattu taulukossa 2.

Ensimmäinen vikaryhmä oli profiilin muotoon ja pinnan laatuun liittyvät työkalut. Näiden tunnistamiseen käytettiin laservaloa. Kappaleen pintaan projisoitiin laserviiva ja kappaleen pintaan nähden kulmassa oleva kamera kuvaa viivaa ja sen muutoksia. Tällä tavalla on mahdollista tunnistaa profiili ja sen mahdolliset poikkeamat sekä pinnassa olevat naarmut ja halkeamat.

Toinen vikaryhmä oli väriin, värieroihin ja muotoon liittyvät viat. Näiden tunnistamisessa käytettiin visuaalista tarkastelua ja valkoista valoa. Käytetty valaistustekniikka oli suuressa kulmassa tuleva valaistus. Tällä saadaan pinnan heijastavuuden aiheuttamat ongelmat eliminoitua ja kohteen kontrastia parannettua. Lisäksi kyseinen valaistustekniikka korostaa pinnassa olevia oksanreikiä ja pihkataskuja, joten niiden tunnistaminen helpottuu.

TAULUKKO 2. Vikojen tunnistaminen eri tekniikoilla ensimmäisessä testissä

Laserviivan tarkastaminen	Visuaalinen tarkistus
Halkeamat	Oksat
Puuttuva "sormi" profiilissa	Pihkataskut
Naarmut	Sydänjuova
Lohkeamat ja työstörepimät	Suuret halkeamat
Pihkataskut, selvä ura	Suuremmat sormijatkosvirheet
Puuttuva , kuiva oksa	

4.3.4 Kappaleen liikuttaminen

Kappaleen liikuttaminen kuvattaessa toteutettiin 40 mm levyisellä hihnakuljettimella. Kuljetinta käyttämässä oli SEW Eurodriven 1,1 kW moottori 206/1400 alenusvaihteella varustettuna. Kuljettimen pituus oli 1,4 metriä, ja kuljettimen lyhydestä johtuen, koekappaleiden pituus oli alle 500 mm. Moottoria ohjattiin Omronin F7-sarjan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajan AJO-ETEEN (Jog fw [S3]) – tieto tuli ohjaavalta logiikalta. Kappale pysäytettiin demonstraatiotilaisuudessa halutulla viiveellä, jotta yleisölle oli helpompi osoittaa järjestelmän löytämä vika paikka koekappaleessa. Hihna oli pysäytettynä muutaman sekunnin ja sen jälkeen hihna käynnistyi uudelleen ja laitteisto oli valmis ottamaan seuraavan kappaleen vastaan.

Kyseisessä taajuusmuuttajassa oli asennettuna Posicontrol-ohjelmisto, joka sallisi kuljettimen ajamisen absoluuttisena tai inkrementaalisenä, paikkatieto säilyttäen. Sovelluksessamme kuljettimen paikkatieto kuitenkin ei ollut kriittinen, kunhan nopeus pysyi vakiona. Tästä syystä kuljetinta ohjattiin suljetun silmukan vektoriohjauksella, jolloin kuljettimen nopeus on erittäin tarkka.

4.3.5 Kameran ajoitus ja järjestelmän ohjaus

Järjestelmän ohjauksessa käytettiin Omronin CJ1M CPU22 modulaarista teollisuuslogiikkaa. Logiikan avulla kameran kuvaus synkronoitiin liikkuvaan kappaleeseen. Säädetäviä arvoja oli mm. kuvauksen aloitusviive valokennolta kameralle ja kuvauksen lopetusviive. Kamerassa oli käytössä jatkuva kuvaustila (Continuous mode), mikä ottaa kuvia sarjana ja analysoi jokaisen kuvan erikseen. Jatkuva kuvaustila on päällä niin kauan kuin kameralaitteiston tulo on vaikutettuna. Logiikan sisään- ja ulostulot ovat listattuna taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Logiikan tulot ja lähdöt

PLC tulot	Selite
0.00	Ajoituksen break beam anturi
0.01	Start –nappi
0.02	NG -tiedon tulo
0.03	Stop –nappi
PLC lähdöt	Selite
1.00	TRIG -tieto kameralle
1.02	Jog fw taajuusmuuttajalle

Logiikkaohjelman toiminta on seuraavanlainen: Käyttäjän painaessa kuljettimen käyntiin Start –napilla, asetetaan muistipaikkaan H0.02 arvo 1. Tämä laittaa kuljettinta ohjaavan lähdön päälle ja kuljetin käynnistyy. Tällöin laitteisto on valmis ottamaan kappaleen vastaan. Käyttäjän syöttäessä kappaleen hihnalle, kappale liikkuu ajoituksen anturin ohitse katkaisten anturin säteen. Logiikassa ajastin laskee katkaisuhetkestä kuvauksen aloitusviiveen (noin 1,3 sekuntia) ja asettaa tämän jälkeen kameran päälle. Kamera kuvaa Continuous -tilassa jatkuvasti TRIG –tulon ollessa aktivoituna. Logiikka sammuttaa kameran lopetusviiveen jälkeen, kun kappale on poistunut kohdistusanturin edestä. Kuvauksen aloitukselle ja lopetukselle on ohjelmassa omat viiveensä, jotta anturin hystereesi ja kameroiden välimatkan aiheuttamat ongelmat saadaan kierrettyä.

Mikäli kamera lähettää NG –tiedon logiikan tuloon 0.02, pysäytetään hihna viiveen jälkeen muutamaksi sekunniksi. Viiveen ansiosta koekappale pysäytetään haluttuun paikkaan ja käyttäjä saa karkeasti tiedon missä kohti koekappaletta vika löytyi. Tämä on huomattavasti havainnollisempaa, kuin esimerkiksi kameran keskusyksikön ruudulta lukeminen.

4.3.6 Valaistusolosuhteiden testaaminen

Ensimmäisen testisession lopullisen kameralaitteiston ollessa valittu, päästiin testaamaan varsinaisia koekappaleita ja luomaan niille erilaisia valaistusolosuhteita. Ensimmäiset kuvaukset tehtiin vallitsevassa valossa ja tässäkin valaistuksessa onnistuttiin löytämään joitakin vikoja koekappaleista. Vallitsevassa loisteputkivalaistuksessa ongelmana on valaistuksen välkkyminen ja valon alhainen intensiteetti kappaleen pinnalla. Molemmat pakottavat melko pitkiin valotusaikoihin, mikä vastaavasti aiheuttaa liike-epätarkkuutta ja käsittelyajan pidentymistä. Molemmat ovat ongelmia konenäkösovelluksissa. (Forsyth ym. 2012.)

Seuraavaksi päästiin testaamaan erilaisia valaistusolosuhteita käytettävissä olevilla laitteistoilla. Käytettävissä oli laaja kirjo erilaisia valaistustekniikoita: halogeenikohdevalot, diffusiivinen kupuvalo, darkfield ledivalot sekä punainen, diffuusinen rengasvalo. Käytössä oli myös kaksikanavainen valaistuksenohjain CCS PTU2-3024, jota voidaan ohjata ulkoisella pulssilla. Tulokset erilaisten valaistusten kanssa olivat lupaavia, mutta ongelmia tuotti valo-ohjaimen synkronointi kameran kanssa. Tähän olisi tarvittu erillinen valo-ohjainmoduuli Omronilta. Täten käytössä olevat valo-ohjaimen vaativat CCS-valot jouduttiin hylkäämään ja etsimään vaihtoehtoinen lähestymistapa.

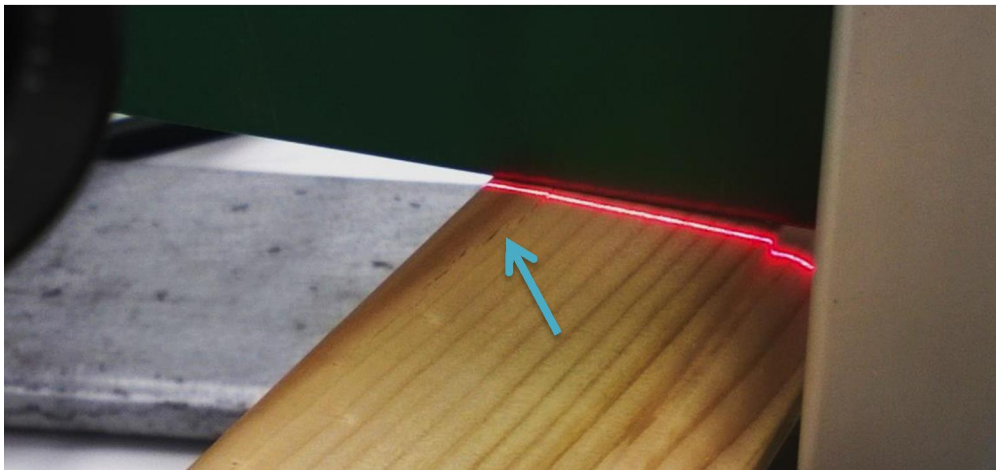
4.3.7 Erilaiset olosuhteet erilaisille vioille

Koekappaleiden vikakirjo käsitti tyypilliset vikatyypit, joita on mm. ydinjuova, oksat, pihkatasku, halkeamat sekä sormijatkoksen ongelmat. Osa vioista on havaittavissa vian sävyyn tai kontrastiin liittyvällä tunnistamisella, osa kappaleen muotoon liittyvällä tunnistamisella. Jotta kappaleen muotoon liittyviä vikoja voitaisiin tutkia luotettavasti, on käytettävä kolmatta ulottuvuutta kuvauksessa. Tämä on mahdollista käyttämällä stereokameraa tai projisoimalla pintaan laserviiva

ja kuvaamalla kameralla viivan muodon muutoksia. Tässä testissä päädyttiin jälkimmäiseen vaihtoehtoon.

4.3.8 Esimerkki: halkeaman tunnistaminen laserviivalla

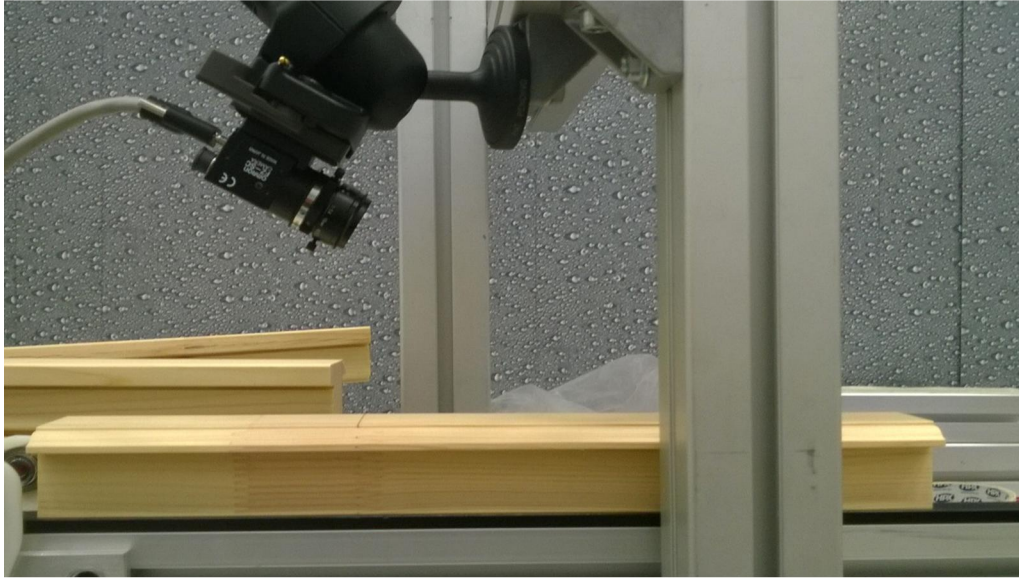
Tässä esimerkissä demonstroidaan pienen halkeaman tunnistaminen laserviivan avulla. Halkeamavika on merkitty nuolella kuvassa 18. Kuva 14 esittää samaa testikappaletta. Kyseisessä tekniikassa kappaleen pintaan projisoidaan laserviiva kappaleen normaalin suunnasta. Viivaprojektorin fokus on asetettava mahdollisimman tarkasti siten, että viiva on erittäin ohut. Viivan on lisäksi oltava pinnalla siten, että se näkyy kamerassa täysin vaakasuorassa.



KUVA 18. Tunnistettava vika ja laserviiva kappaleen pinnassa

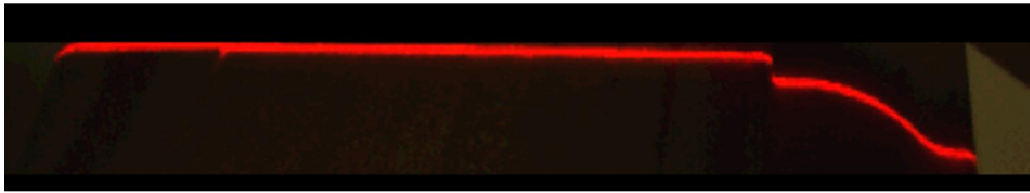
Kamera sijoitetaan kuvan 19 mukaisesti kulmaan tutkittavaan kappaleeseen nähdä. Tällöin saadaan tutkittua kappaleen muotovirheisiin ja dimensiioihin liittyviä virheitä. Tällä tekniikalla on mahdollista saada kappaleesta 3D-projektio yhdellä kameralla. Samalla tekniikalla saadaan esille myös virheellinen profiili sekä puuttuva "sormi" sormijatkoksessa (KUVA 9). Lisäksi tällä tekniikalla voidaan löytää myös höyläyksessä tai tapituksessa tulevat repeämät, mikäli repeämä on kappaleen

leen näkyvällä pinnalla. Myös höylänterässä olevat virheet on mahdollista havaita tällä tekniikalla, mikäli näkyvällä pinnalla on selvää piirtojälkeä.



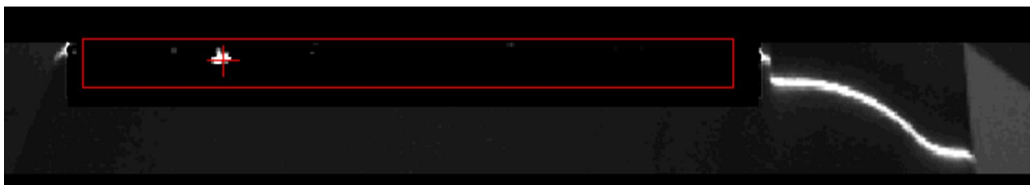
KUVA 19. Laserviivan kuvaamista

Testi osoitti, että tällä tekniikalla pystytään havaitsemaan myös erittäin pienet halkeamat kappaleen pinnassa. Laserviivan valo leviää halkeaman kohdalla ja aiheuttaa normaalisti suorassa viivassa epäjatkuvuuskohdan (KUVA 20). Tämä epäjatkuvuuskohta voidaan suodattaa esille pystysuuntaisia piirteitä etsivällä työkalulla. Lisäksi sen jälkeen tätä löydettyä vikaa voidaan korostaa (KUVA 21). Tämän jälkeen voidaan käyttää esimerkiksi Defect- tai Area-työkalua vian tunnistamiseen. Prosessoriajan säästämiseksi ja siten ohjelman kiertojajan lyhentämiseksi kannattaa kuva muuttaa mustavalkoiseksi käyttäen punaista kanavaa. Lisäksi kuvasta kannattaa suodattaa turha tieto pois asettamalla sopivat ala- ja ylärajat kuvan valoisuudelle.



KUVA 20. Laserviiva konenäkökameralla kuvattuna

Laserviiva ei ole täysin ongelmaton tutkittaessa mäntyisiä koekappaleita. Punainen kesäpuu johtaa punaista laservaloa jonkin verran. Tämä näkyi kuvassa pysyysuuntaisina viivoina ja se toisinaan aiheutti virheellisiä tunnistuksia. Tämän ongelman kiertämiseksi voisi olla järkevää kokeilla erivärisiä laserlähteitä vastaavassa tarkoituksessa. Lisäksi testissä huomattiin, että visuaaliseen tunnistamiseen ja laserviivaan perustuvan tunnistamisen kuvaamiset häiritsevät toisiaan. Laserin kanssa olisi optimaalista olla täysin pimeää ja toisessa tarvitaan hallittua valaistusta. Tämä ongelma ratkaistiin asettamalla valoa läpäisemätön este kameroiden kuva-alueiden väliin. Tämä este on nähtävissä kuvassa 18.



KUVA 21. Viiva suodatettuna ja vika tunnistettuna

4.3.9 Testissä kohdattuja ongelmia

Ensimmäinen testi ei sujunut täysin ongelmitta. FZ2-sarjan laitteissa ongelmaksi muodostui vähäinen keskusyksikön käyttömuisti työkalujen tarpeisiin. Usein törmättiin ongelmiin erityisesti visuaalisessa vikatunnistamisessa. Defect ja Area –

työkalut toimivat epäluotettavasti. Kyseisten työkalujen hakualue oli oltava erittäin pieni, jotta ne suostuivat ylipäänsä toimimaan. Tällöinkin laite antoi toisinaan virheellisen tunnistuksen, kun mittaus ei onnistunut. Tähän ongelmaan ei testien aikana löytynyt varmasti toimivaa ratkaisua. Sitä pystyi minimoimaan käsittelemällä kuvia siten, että niissä oli mahdollisimman vähän häiriöinformaatiota ja pitämällä hakualue erittäin pienenä.

Lisäksi laitteen lokitiedostojen käsittelyssä havaittiin puutteita. FZ2-sarja pystyy käsittelemään maksimissaan 999 tallennettua lokikuvaa. Mikäli ulkoiselle muistille tallentui yli 999 kuvaa, hidastui käyttöliittymä niin huomattavasti, että käyttö muuttui mahdottomaksi. Ratkaisuna tähän oli tyhjentää lokikansio toistuvasti. Tämä oli käytännössä suoritettava erillisellä tietokoneella. Lokikansion tyhjentäminen FZ2:n käyttöliittymässä ei ollut riittävä toimenpide.

4.3.10 Ensimmäisen testin johtopäätöksiä

Ensimmäinen testin tulokset olivat erittäin rohkaisevia. Tämänkin testin vajavai-
silla valaistusmahdollisuuksilla pystyttiin löytämään melkein kaikki vikatyypit. Ainoa vikatyyppi, jota ei pystytty luotettavasti tunnistamaan oli pihkatasku, johon ei liittynyt selvää muotovirhettä (KUVA 11). Tällainen vika on hankala, koska siihen ei liity selkeätä värieroja eikä muotovirhettä. Oksat ja ydinjuovat löytyivät visuaalisella, väriin ja tummuuteen perustuvalla tarkistuksella.

Tulokset olivat sen suuntaisia, että töitä päätettiin jatkaa. Seuraavaan testiin tarvittiin käytettäväksi laitteisto, jossa ei ole FZ2:n rajoituksia. Tarvittiin siis laitteisto, jossa työkalut toimisivat luotettavasti, keskusyksikkö olisi vakaampi ja valojen tahdistus onnistuisi. Lisäksi ensimmäisen testin kameroiden 0,3 megapikseliä todettiin riittämättömiksi. Erottelukykyyn rajat tulivat vastaan erityisesti pienimpien halkeamien kanssa. Käytännössä erottelukyky kappaleen pinnassa oli n. 10 pikse-

liä / mm. Teoriassa kappaleen pinnalla oleva hiushalkeama vastasi kuvassa vain yhtä pikseliä. Käytännössä erottelukyky ei riittänyt halkeaman havaitsemiseen visuaalisella tarkastelulla.

4.4 Toinen ja kolmas testi

Toinen ja kolmas järjestettiin Omronin lainaamalla testilaitteistolla. Testit suoritettiin kahdessa viikon mittaisessa jaksossa keväällä 2014. Kuvausjärjestelyissä voitiin käyttää ensimmäisessä testissä rakennettua laitteistoa kuvattavan kohteen liikutukseen ja kameran synkronointiin. Testiä varten saatiin Tiiviltä uusia testikappaleita, jotta kappaleiden ikääntyminen ja tummuminen eivät vääristäisi tuloksia. Tässä testissä otettiin lisäksi käyttöön kappaleen päätyprofiilin tarkistaminen mahdollisten tappikoneen työstövirheiden ja päässä olevien sormijatkosvirheiden löytämiseksi. Tämän johdosta testikappaleiden oli oltava lyhentämättömiä.

Tämän testin tavoite oli löytää olosuhteet ja työkalut jokaiseen vikatyyppiin. Lisäksi tavoitteena oli löytää sopivat kuvausolosuhteet siten, että koko laitteisto olisi toteutettavissa yhdellä keskusyksiköllä. Yhdessä keskusyksikössä voi olla enimmillään kahdeksan kameraa (Omron 2014c). Lähtökohtana testeille oli ensimmäisen testin tulokset ja ensimmäinen testipäivä käytettiin tulosten toistamiseen uudemmalla kalustolla.

4.4.1 Toisen ja kolmannen testin laitteisto

Toinen ja kolmas testi suoritettiin Omronin FH-3050-20 – keskusyksiköllä sekä korkeamman resoluution kameroilla. Testiin saatiin lainaksi keskusyksikkö sekä kaksi kameraa ja kameroiden johdot. Lisäksi testissä käytettiin FZ2:n kameroita, jotka ovat yhteensopivia myös FH – sarjan kanssa. FH – sarjan keskusyksiköt tukeva EtherCAT – väylällä tapahtuvaa tiedonsiirtoa. Tämän ansiosta sen saa yksin-

kertaisesti ja pienin kustannuksin liitettyä osaksi NJ – sarjan koneenohjaimella toteutettua konetta, joka myös käyttää EtherCAT – kenttäväylää.

Käytettävissä oli myös kaksikanavainen valaistuksen strobo-ohjain CCS PTU2-3024. Lopullisessa laitteistossa valaistuksena olivat suuressa tulokulmassa oleva led-valaistus jota ohjattiin kaksikanavaisella strobo-ohjaimella. Lisäksi käytössä oli diffusiivinen taustavalo ja sitä varten 24V laboratoriovirtalähde päätyprofiilin kuvaamiseen sekä halogeenivalaisin polarisaatiosuotimella varustettuna.

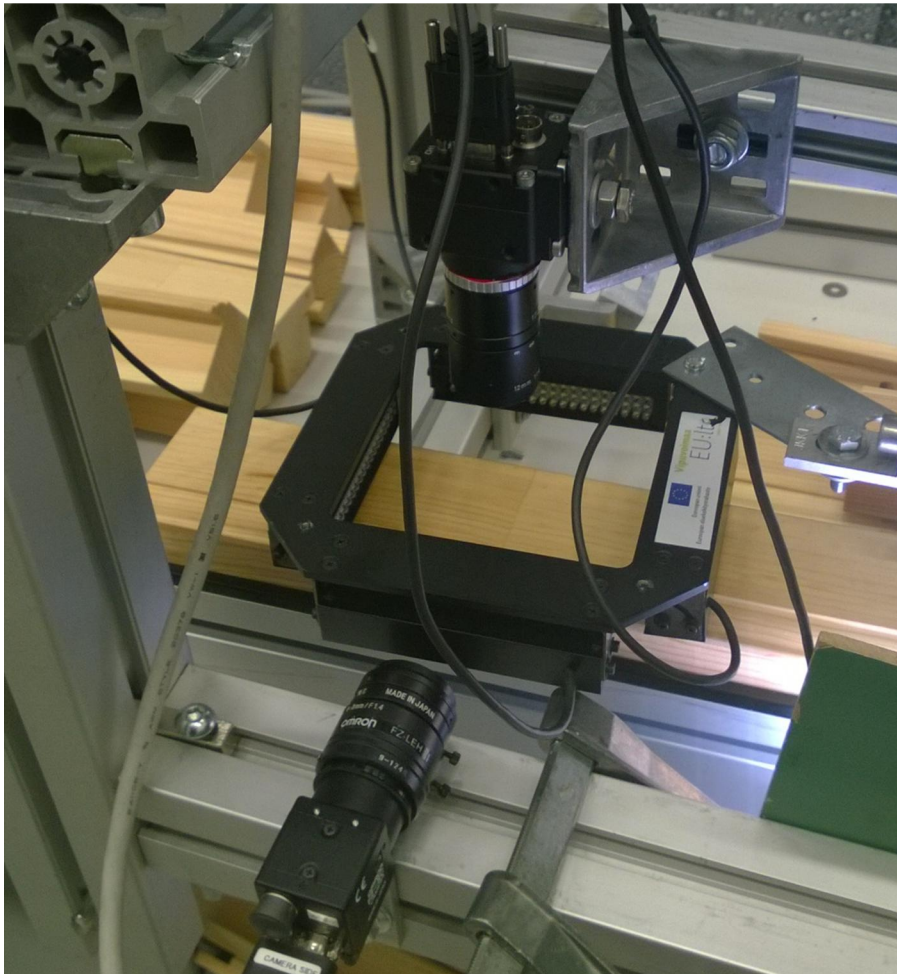
4.4.2 Kamerat ja objektiivit

Testissä käytetyt kamerat olivat kahden megapikselin FH-SC02, viiden megapikselin FZ-SC5M2 ja kaksi 0,3 megapikselin FZ-SC –kamerat. Yhteensä käytössä oli siis neljä kameraa. FH-SC02 on erittäin hyvin soveltuva kamera tämän tyyppiseen tutkimukseen, koska sen kuvasuhde on erittäin leveä 2:1. Käytännössä käytettävissä oleva vaakaresoluutio on 2040 pikseliä ja pystyresoluutio 1088 pikseliä. Valokuvauksesta tuttu 4:3 kuvasuhde ei useimmiten ole paras mahdollinen, koska kuvattaessa linjalla liikkuvaa tavaraa, mahdollisimman leveä vaakaresoluutio antaa korkean erottelukyvyn kappaleen leveyden suhteen. Tutkittava kappale liikkuu kameran kuvassa pystysuunnassa, joten pystyresoluutiota ei tarvita kovinkaan paljoa.



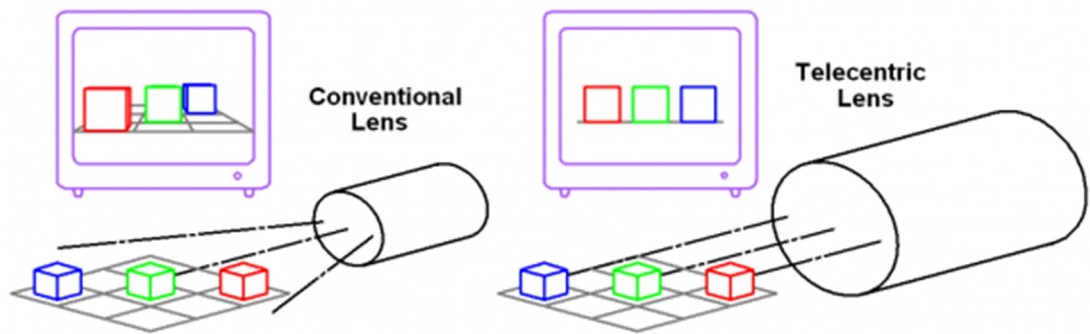
KUVA 22. Kaikki kamerat käytössä

Kappaletta kuvattiin kolmella eri kameralla. Tärkein kuvattava kohde oli kappaleen sisäpuolelle näkyvä pinta, joka kuvattiin FH-SC02 – kameralla. FH-SC02 – kameran kanssa käytössä oli 12 mm F1.4 – objektiivi ja n. 0,5 mm korotusrenkas. Kappaleen näkyvää särmää kuvattiin sivusta päin FZ-SC - kameralla ja 8 mm F1.4 – objektiivilla. Kameroiden asettelu näkyy kuvissa 22 ja 23. FZ-SC5M2 – kameralla kuvattiin kappaletta eri linjassa polarisoidussa kohdevalossa. Valon eteen asetettiin polarisaatiosuodin ja kameran eteen toinen suodin, joka oli 90 asteen kulmassa valon suotimeen nähden. Tällä asetelmalla löydettiin joitakin vaikeimpia vikoja kuten pihkataskut. Tämä kuvausasetelma näkyy kuvan 22 oikeassa reunassa.

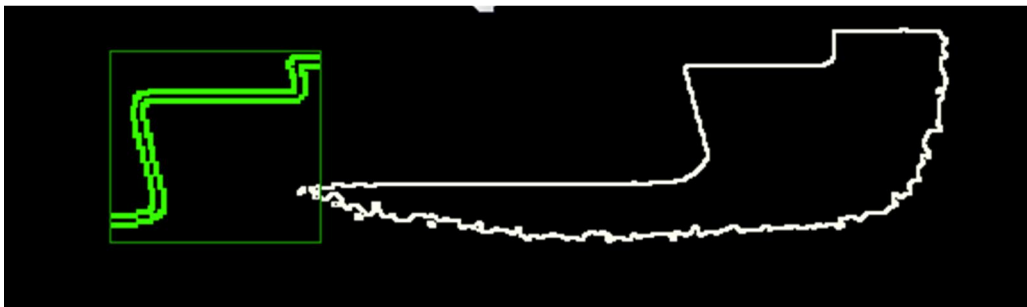


KUVA 23. Kappaleen kuvaus ylhäältä ja sivulta

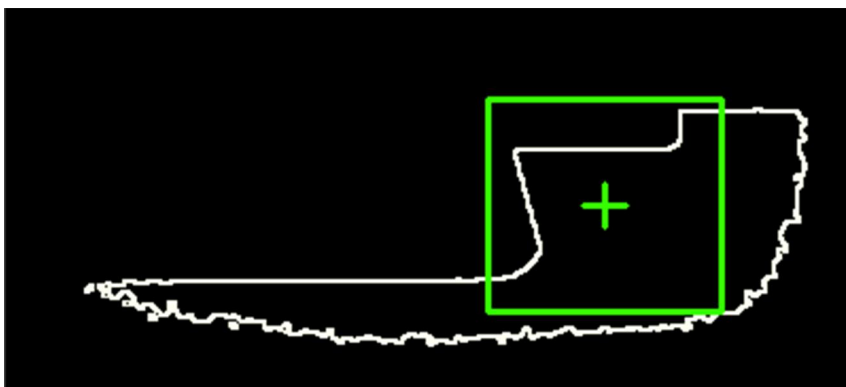
Kappaleen pääty kuvattiin diffusiivista taustavaloa vasten toisella FZ-SC – kameralla ja 16mm F 1.4 - objektiivilla. Taustavaloa vasten kuvattaessa olisi hyvä käyttää telesentristä (*telecentric*) (KUVA 24) objektiivia, joka hävittää perspektiivin kuvasta ja profiilin mittaamisesta tulee tarkempaa. Käytettäessä normaalia linssiä on kamera saatava mahdollisimman kauaksi kuvattavasta kohteesta, koska kappaleella on syvyyttä kuvaussuunnassa noin 60mm. Kohdistamalla kuvauspaikka tarkasti saadaan perspektiivin tuomia ongelmia minimoitua. Kuvasta tutkitaan, onko päätytapituksen profiili oikea ja onko siinä muita virheitä, kuten repeämiä tai sormijatkosvirheitä (KUVA 25 ja KUVA 26).



KUVA 24. Telesentrinen linssi hävittää kuvasta perspektiivin



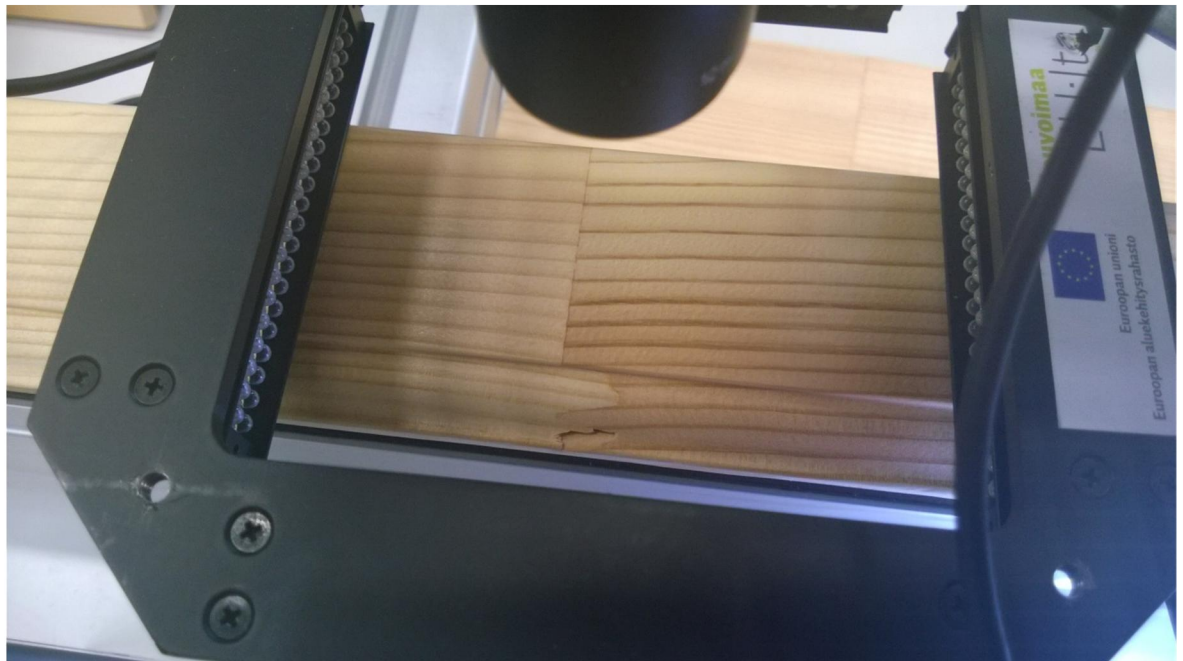
KUVA 25. Päätyprofiili kuvattuna ja vertailukuva oikeanlaisesta profiilista



KUVA 26. Päätyprofiilin korrelaatio mitattuna. Korrelaatio kuvassa noin 84.

4.4.3 Suuren tulokulman valaistus

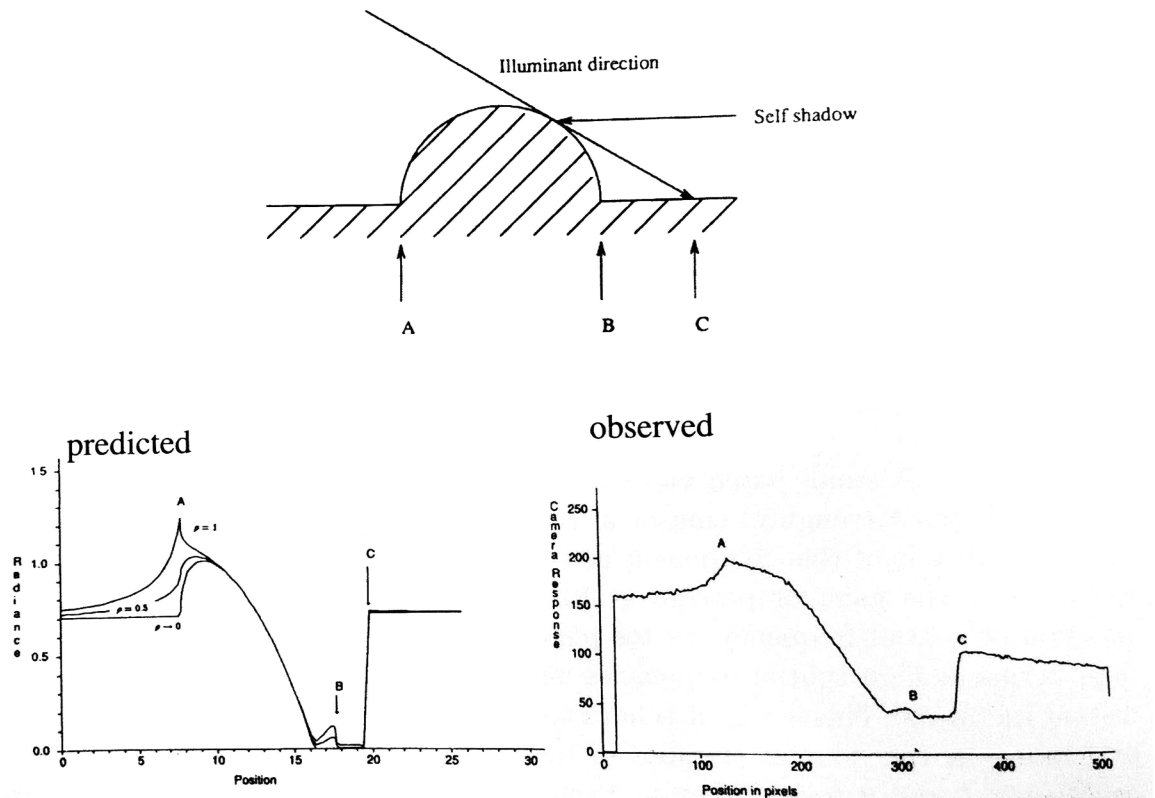
Näissä testeissä saatiin käyttöön synkronoitu valaistus. Uudessa FH – sarjan Xpectiassa on vakiona STGOUT⁴ – lähdöt. Tämän ansiosta nyt saatiin käyttöön suuressa kulmassa oleva valaistus kunnollisilla valolähteillä (KUVA 27). Testissä oli käytössä neljä 90mm pitkää valonlähdettä asennettuna siten, että valon tulokulma kappaleeseen nähden on mahdollisimman suuri. Valojen ohjaus on toteutettu siten, että syyn suuntaisten ja poikkisyyhyyn olevien valojen pulssinpituus voidaan säätää toisistaan riippumatta erikseen. Tämän ansiosta oli valaistus mahdollista säätää mahdollisimman tasaiseksi ja silti säilyttää riittävästi varjojen tuomaa informaatiota kuvassa.



KUVA 27. Suuressa kulmassa tuleva valaistus

⁴ STGOUT (*Stroboscope trigger out*) on valaistuksen synkronointiin käytettävä Strobolähtö. FH – mallistossa on tarvittaessa mahdollista synkronoida kaikki kahdeksan eri linjaa toimimaan itsenäisesti.

Valon kulman ollessa suuri, saadaan kappaleen pinnasta korostettua pinnanlaatuun liittyviä vikoja. Tällaisia vikoja ovat mm. terän jättämät piirtojäljet, painumat, halkeamat ja pihkataskut. Parhaiten viat saisi korostettua, mikäli valo tulisi vain yhdestä suunnasta. Valon tullessa suuressa kulmassa, valaistuksen intensiteetti muuttuu jyrkästi mentäessä kauemmaksi valaisimesta. Tästä syystä käytännön kokeissa jouduttiin kappaletta valaisemaan neljästä suunnasta. Forsyth ja Ponce (2012) nostavat kirjassaan esille mahdollisuuden tutkia kappaleen pinnanmuotoja kuvaamalla kappaletta eri suunnista tulevilla valaistuksilla kameran pysyessä paikoillaan (KUVA 28). Tämän saman voisi toteuttaa yhdellä kuvauskeralla, siten että valaistaan eri suunnista eri valon aallonpituuksia ja kuvataan kappaletta värikameralla. Värikuvasta suodatetaan eri aallonpituudet ja näitä suodatettuja kuvia käytetään tarkastusten kohteina. Tällöin olisi mahdollista luotettavammin havaita sekä syyn suuntaisia, että syyn poikkisuuntaan meneviä vikoja, kuten naarmuja (Forsyth ym. 2012, 81).

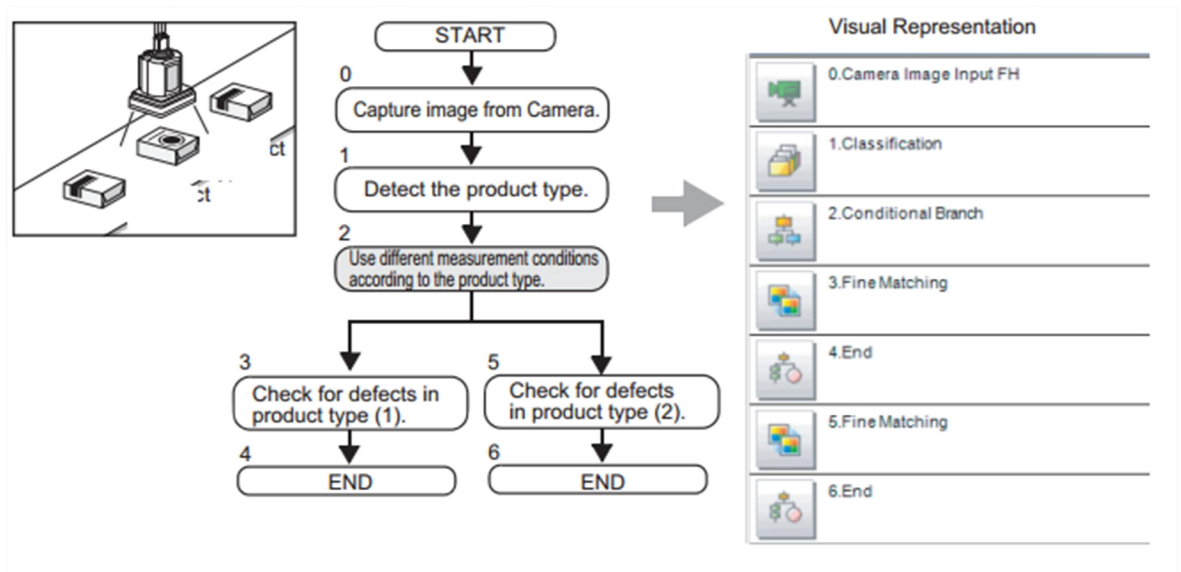


KUVA 28. Valon ja varjon merkitys pinnan muodon tulkitsemisessä kaksiulotteisessa kuvassa (Forsyth ym. 2012, 90)

4.4.4 Käytetyt työkalut ja suodattimet

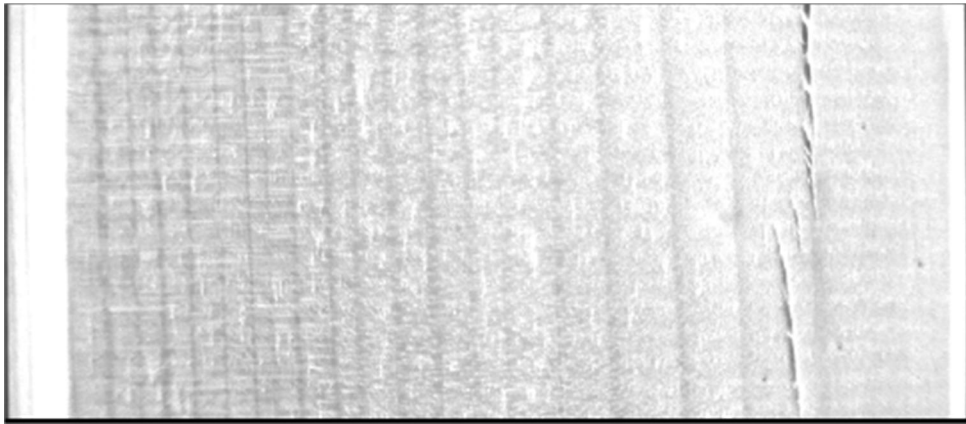
Erilaisten tutkimukset Omronin konenäkölaitteissa ryhmitellään omiksi sceneiksi. FH:lla eri scenejä voi olla enimmillään 4096 kappaletta. Eri scenet luodaan esimerkiksi eri profiileille. Mikäli tuotantoon tulee uusi profiili, on tälle myös luotava oma scene. Scenen vaihtaminen automatisoidaan ohjausjärjestelmän tehtäväksi. Scenen sisällä työkalut ja suodattimet asetetaan hierarkkiseen ketjuun, josta käytetään nimitystä flow. Flow:ssa olevat työkalut ja muut prosessin osat suoritetaan numerojärjestyksessä. Kuvassa 29 on esiteltynä erään tarkastuksen Scene. Kyseisessä kuvassa näkyy oikeassa reunassa Flow, jota laite jokaisella tarkastuskierroksella noudattaa. Tässä tapauksessa on mukana myös Classification ja Conditional

Branch-työkalut, joilla voidaan luoda Flow:hon ehdollisia tarkastuksia ja haa-
raumia.



KUVA 29. Esimerkki scenestä ja flow:sta (Omron 2014b)

Tarkastuksen rakentamiseen muodostui työn edetessä hyväksi todettu rutiini. Aluksi kameran asetukset asetettiin siten, että tunnistettava vika saatiin kuvassa mahdollisimman selkeästi esille. Kameran asetuksissa tähän vaikutetaan lähinnä säätämällä kameran valkotasapainoa ja valotusarvoja. Lisäksi kamerasta kannattaa lukea vain ne vaakalinjat, millä on merkitystä tarkastuksen kannalta. Tämän jälkeen kuvaa käsitellään siten, että siitä saadaan poistettua mahdollisimman paljon kohinaa ja tarpeetonta informaatiota. Tämä yleensä käsittää harmaavärisuodattimen (KUVA 30) sekä erilaisia kohinasuodattimia.



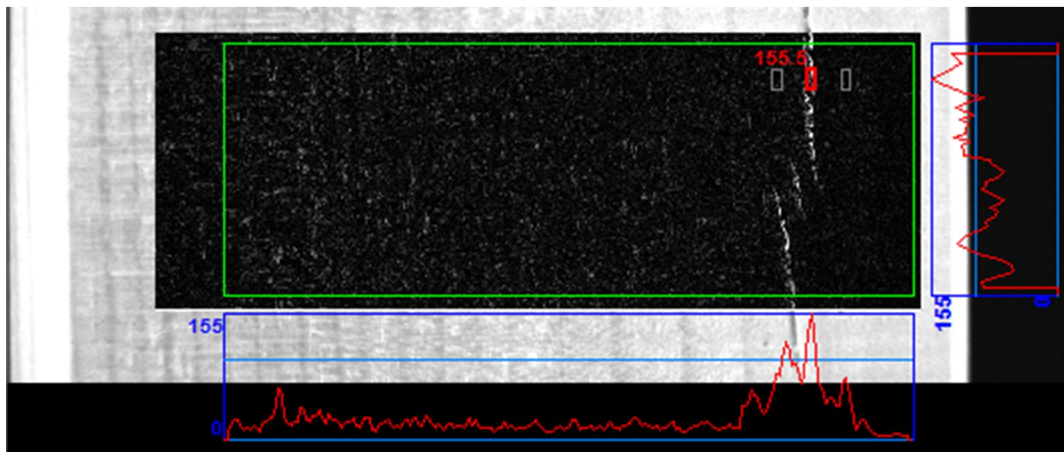
KUVA 30. Kameran kuva vikapaikasta harmaasävyinä

Erityisen hyödyllisiksi osoittautuivat erilaiset särmäntunnistustyökalut, kuten *extract vertical edges* ja *extract horizontal edges*. Nämä työkalut etsivät kuvasta tietynsuuntaisia särmiä, kuten kappaleen reunaa. Myös naarmut löytyivät hyvin em. työkaluilla. Erityisen hyviä tuloksia saatiin aikaiseksi ohjelmistossa olevan Roberts Cross - suodattimen kanssa (KUVA 31). Tällöin saatiin eliminoidua terveen puun syykuviot tehokkaasti, mutta vikapaikkaa korostettua.

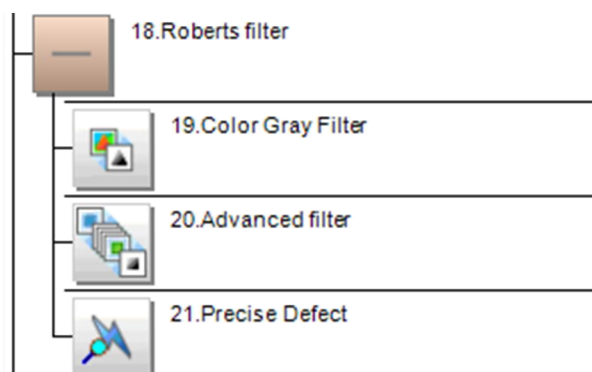


KUVA 31. Kuva suodatettuna Roberts Cross – suodattimella

Lopuksi käsitelystä kuvasta etsittiin vikaa asiaan soveltuvalla työkalulla. FH-sarjan Xpection Precise Defect-työkalu (KUVA 32) todettiin erittäin tehokkaaksi esimerkin tapauksessa. Kyseisellä työkalulla on mahdollista etsiä poikkeavia piirteitä kuvasta erilaisten parametrien avulla. Työkalu vertailee asetetun kokoisen ja muotoisen alueen poikkeavuutta läheisiin alueisiin mm. pikselien valaisuarvon perusteella. Työkaluun asetetaan vertailusuunnat ja kuinka kaukaa se vertailee poikkeavuutta. Lopuksi työkaluun asetetaan poikkeavuuden maksimiarvo, jonka ylittyessä työkalu antaa NG-signaalin.



KUVA 32. Vika löydettyä Precise Defect – työkalulla



KUVA 33. Kuvien 30, 31 ja 32 Flow

Kuvien 30, 31 ja 32 kappale on valaistu suuressa kulmassa tulevalla valolla neljästä suunnasta. Kappale on kuvattuna FH-SC02 – kameralla. Kyseisessä esimerkissä käytetään harmaavärisuodinta, Roberts Cross – särmänerotustyökalua ja Precise Defect – työkalua. Erilaisilla Precise Defect – työkalun asetuksilla voidaan löytää hyvinkin erityyppisiä vikoja, ilman puun normaali syyvaihtelun tuomia virheellisiä tunnistuksia. Esimerkin Flow on esitelty kuvassa 33.

4.4.5 Kappaleen liikuttaminen ja kohdistaminen

Toisessa ja kolmannessa testissä kappaleen liikuttaminen tehtiin käsin. Tämä johtui siitä, että testien aikataulut olivat melko kiireiset ja testeissä haluttiin maksimoida ajankäyttö varsinaisten työkalujen ja valaistuksen testaamiseen. Ensimmäisessä testissä opittiin, että valotusajan on oltava erittäin lyhyt ja valaistuksen strobo – tyyppistä, jotta liike-epätarkkuus ei pilaa tuloksia. Tästä syystä valotusajat ja valojen ohjaus asetettiin suoraan tasolle, jolla liike-epätarkkuus saadaan hävitettyä. Testeissä todettiin että valotusajan on oltava luokkaa 1/250 sekuntia tai lyhyempi, jotta liike-epätarkkuus eliminoiduu. Tällöinkin valotusaika on 5 millisekuntia, mikä lisää suoraan ohjelman kiertoaikaa. Valotusajan merkitys ohjelman kiertoaikaan muuttuu merkityksettömäksi FH-sarjan kameroilla, kun valotusaika on 1/1000 s tai lyhyempi.

Kuvauksessa käytettiin jatkuvaa kuvausta ja kappaleita liikutettiin käsin kameran alla. Samalla saatiin tutkittua kuvauksen ja kuvakäsittelyn vaatimaa kiertoaikaa ja päästiin arvioimaan koneen linjanopeuden maksimitasoa. Kiertoaika testeissä oli luokkaa 27 ms ja kuvausalan ollessa noin 20mm, on kappaleen linjanopeuden maksimi noin 44 m/min. Kuvausalaa on mahdollista vielä kasvattaa, mikäli linjanopeutta on tarvetta nostaa yli em. lasketun.

4.4.6 Testeissä kohdattuja ongelmia

Testien aikataulut osoittautuivat turhan tiukoiksi. Asiakasdemonstraatiot siirrettiin kolmannen testin loppuun, koska toiseen testiin niitä ei aikataulusyistä saatu mahdutettua. Aikataulun tiukkuudesta johtuen tyydyttiin liikuttamaan kappaleita käsin, koska kohdistuksiin olisi kulunut käytännössä kokonainen testipäivä. Aikataulun tiukkuudesta johtuen myös alun perin suunniteltu EtherCAT testaus NJ – sarjan koneenohjaimen kanssa jätettiin tekemättä. Yleisesti ottaen FH -sarjan laitteet olivat huomattavasti paremmin toimivia kuin vanha FZ2.

4.4.7 Toisen testin johtopäätöksiä

Toisessa testissä todettiin, että suuressa kulmassa tuleva valo on riittävän tarkka korvaamaan sekä laserviivakuvauksen, että visuaaliseen tunnistamiseen perustuvat kuvaukset. Tällöin riittää yksi kamera per sivu.

Ensimmäisen testin ongelmallisoin tapaus, eli pihkatasku onnistuttiin ratkaisemaan käyttäen polarisoitua valoa. Terveen puun pinta ei ole erityisen kiiltävä, vaan se diffusoi valoa tehokkaasti. Sen sijaan pihkataskut ja useimmat oksatyypit huomattiin testeissä kiiltäviksi. Tästä syystä kun valo tulee pintaan polarisaatiosuodattimen kautta ja kameran eteen asetetaan erisuuntainen polarisaatiosuodin, näkyy terve puu tasaisen vaaleana ja vikapaikat korostuvat tummana. Tällä metodilla saatiin myös vähennettyä huomattavasti voimakkaan kevät- ja kesäpuun syyvaihdelun tuomia virheitä.

Lopullisessa laitteistossa voisi olla yksi kamera per sivu kuvaamassa suuren tulo-kulmankulman valossa. Yksi kamera kuvaamassa kappaleen päädyt tapitusvirheiden varalta sekä yksi kamera polarisoidun koaksiaalivalon kanssa merkitsevimmällä sivulla poistamassa pihkataskut puitteen sisäpuolelle näkyvältä pinnal-

ta. Tämä tekee yhteensä kuusi kameraa kahdeksasta mahdollisesta. Tällöin käytössä olisi vielä kaksi kameraa muihin testauksiin tai tulevaisuuteen laajennusvaraksi.

Testeissä todettiin uusi FH –sarja erittäin suorituskykyiseksi sekä monipuoliseksi konenäköjärjestelmäksi. Erityisen paljon kiitosta sai uusi Presice Defecet –työkalu, joka mahdollisti hyvin erilaisten vikojen tunnistamisen hankalasta ja vaihtelevasta testiaineistosta. Lisäksi suorituskyky todettiin riittäväksi usean kameran järjestelmään. Uusissa laitteistoissa on mahdollista asettaa jokainen kamera itsenäisesti suoritettavaksi säikeekseen. Tällöin jokaisella säikeellä voi olla oma looginen suorittimensa ja oma TRIG –tulonsa. Käytännössä tämä tarkoittaa että yhdessä keskusyksikössä voi olla kahdeksan täysin itsenäistä tarkastusta.

Lisäksi uuden FH –sarjan rinnakkaistamisominaisuudet todettiin erittäin hyödyllisiksi. Yhdestä kuvasta voitiin yhtäaikaaisesti tehdä useita tarkastuksia tarvittaessa erilaisilla suodatuksilla. Perinteisessä järjestelmässä yhdestä kuvasta tehtävät tarkastukset tapahtuvat perättäin ja sitä myöten ohjelman kiertoaika kasvaa helposti erittäin pitkäksi. Rinnakkaistamalla toimenpiteitä pystyttiin suorittamaan testien mukaan kymmenenkin tarkastusta ilman että suoritusaika kasvaisi pidemmäksi kuin yksittäisen, hitaimman tarkastuksen suoritusaika olisi yksinään. Suorituskyvyn rajat on käytännön tilanteissa testattava tapauskohtaisesti, mutta näissä testeissä ei suorituskyvyn rajoja vielä saavutettu, vaikka käytössä oli kolme säiettä ja näissä yhtäaikaaisesti yli kaksikymmentä tarkastusta.

4.5 Tulosten esittely sidosryhmälle

Tulokset esitettiin sidosryhmälle kolmannen testin lopuksi. Esittelytilaisuudessa olivat mukana Osmo Laitila Tiivituote Oy:stä, Simo-Pekka Kivioja Kivioja Engineering Oy:stä. Esittelytilaisuudessa käytiin läpi kaikki tutkittavat vikatyypit

Tiivin toimittamalla testiaineistolla. Laitteisto toimi testissä luotettavasti ja ongelmitta. Testissä todettiin, että laitteistossa on suuri potentiaali ja se tekee sen mitä sen on tarkoituskin. Päätettiin, että opinnäytetyön pohjalta voidaan ruveta kehittämään laitteistoa asiakkaalle, joka automatisoi ikkunanpuitteiden vastaanoton tehtaassa.

5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön alustava työ alkoi Centria-ammattikorkeakoulun Tuotannon automatisointiprojekti – nimisen kurssin yhteydessä. Tämän kurssin puitteissa tehtiin alustava tutkimus aiheesta ja ensimmäinen testisessio. Kurssilla tehty testisessio on tässä työssä nimetty ensimmäiseksi testaukseksi. Kurssilla saadut tulokset olivat lupaavia ja tämän perusteella nähtiin sidosryhmässä järkeväksi asettaa uusi jatko projekti, jonka puitteissa tekijä laatisi tuotantotalouden koulutusohjelman opinnäytetyön.

Projektin kulku meni pääpiirteittäin suunnitellun aikataulun mukaan. Käytännössä aikataulutuksen ja työnjaon painotukset eivät olleet täysin suunnitellun mukaisia. Aikaa meni suunniteltua enemmän laitteistojen ja ohjelmistojen käytön opiskeluun sekä valaistustestaukseen. Varsinaisen demo-laitteiston valmistaminen tapahtui työn kuluessa ja sen vaatima työmäärä oli yllättävän pieni. Suurin osa käytetystä työajasta kului Omronin Xpectian parametrisoinnin harjoittelussa sekä valaistusolosuhteiden testauksessa. Tämä työ kuitenkin oli hedelmällistä ja opinnäytetyössä onnistuttiin löytämään vaadittavat parametrit ja valaistukset koekappaleiden vikojen luotettavaan tunnistamiseen.

5.1 Tiedottamisen onnistuminen

Opinnäytetyön aikana oltiin yhteydessä sidosryhmiin tarvittaessa. Lisäksi opinnäytetyöstä tiedotettiin oppilaitoksen sisällä tarpeen mukaan. Tämä tiedottaminen osoittautui kannattavaksi, koska opinnäytetyön demonstraatiotilaisuus saatiin yhdistettyä Centrian kurssitoimintaan ja sen myötä tiedotusta saatiin laajemmalle

potentiaaliselle asiakasryhmälle. Tämä demonstraatiotilaisuus herätti kohderyhmässä mielenkiintoa ja poiki mahdollisia jatkoprojekteja saman tutkimushaaran saralta mahdollistaen uusia potentiaalisia asiakassuhteita eri tahojen kanssa.

5.2 Opinnäytetyön vaikutukset

Opinnäytetyötä voidaan pitää onnistuneena, koska tässä tuotettiin sidosryhmälle uutta tietoa laitteistojen mahdollisuuksista höylätyn puutuotteen laadun tarkistamisessa. Lisäksi projektilla on mahdollisesti positiivinen vaikutus tekijän työllistymiselle. Työllistyminen edellyttää sen, että projektin kaupallistettua jatkokehitysversiota saadaan myytyä käytännön konetoimitusprojekteihin. Ilman tutkimusta ja teknologiatestausta on erittäin vaikea saada asiakasta vakuutettua teknologian toimivuudesta. Tällä saralla opinnäytetyö on täyttänyt tavoitteensa.

5.3 Johtopäätökset

Opinnäytetyön johtopäätöksenä voidaan todeta, että myös jo vanhahkolla FZ2-sarjan kameralaitteistolla on mahdollista tehdä höylätyn tuotteen laaduttamista. Uudemmallalla ja tehokkaammalla FH-sarjalla on mahdollisuudet tarkempaan tulokseen, koska saatavilla on tarkemmat kamerat sekä enemmän laskentatehoa. Lisäksi tarkastustyökalut ovat kehittyneet huomattavasti FZ2 julkaisun ajoista.

Toisena johtopäätöksenä voidaan myös todeta, että Omronin FH 3050-20 on riittävän tehokas ja monipuolinen konenäköratkaisu vastaamaan höylätyn puumateriaalin laaduttamistarpeisiin. Kyseinen laite on helppo yhdistää NJ-sarjan koneohjaimiin ja sitä myöten valmiin koneen rakentaminen on helpompaa ja vaatii vähemmän johdotusta, koska voidaan käyttää EtherCAT -kenttäväylää. FH-sarjan

kameroiden resoluutiovaihtoehtoista löytyy riittävän tarkat sekä nopeat kamerat liikkuvan kohteen kuvaamiseksi.

Kolmas johtopäätös on, että valaistuksen suunnittelu ja siinä onnistuminen on konenäköprojektin tärkein asia. Ilman kunnollista valaistusta on mahdotonta tunnistaa vikoja riittävällä tarkkuudella. Valaistus on oltava tarkoitukseen sopivaa ja muuttumatonta. Lisäksi kuvattava kohde on suojattava hajavalon vaikutukselta. Valaistuksen intensiteetti pitää olla korkea ja synkronoinnin on oltava tarkka ja vakaa. Tällöin liikkuvan kuvauskohteen tuoma liikesumeus ei pääse pilaamaan tuloksia.

5.4 Mahdollisia lisätutkimuksia

Demonstraatiotilaisuus herätti mielenkiintoa myös muissa yrityksissä. Tekijän näkemyksen mukaan konenäkösovellukset ovat melko vähän hyödynnetty mahdollisuus puuteollisuudessa keskimäärin. Mahdollisia sovelluskohteita löytyy useista höyläämöistä, maalaamoista, ikkuna- ja ovitehtaista sekä kalvopinnoituksesta. Ongelmana on alan konservatiivisuus uusia innovaatioita kohtaan. Tämä on kuitenkin voitettavissa testaamalla uusi käyttökohde huolellisesti aidoissa olosuhteissa.

Eräs asia, joka jäi tutkimuksen ulkopuolelle, on laitteiston pölynsuojaus. Tämä asia on ikuinen ongelma puuteollisuuden koneissa. Pöly on erittäin tunkeutuvaa ja pihkaista. Se tarttuu kiinni voimakkaasti ja sotkee linssien lasit ennen pitkää, mikäli niitä ei suojata. Laitteiston suunnittelussa kotelointi on tärkeässä osassa. Yksi mahdollisuus on käyttää umpikoteloja, jossa kamerat ovat lasin takana. Kotelossa on oltava pieni ylipaine ja lasien helposti puhdistettavissa.

LÄHTEET

Azad, P., Gockel T. & Dillmann R. 2008. Computer Vision: Principles and Practice. Aachen, Saksa: Elektot International Media BV.

Beijer Electronics. 2000. Konenäkötekniikan uusi suunta.

Davies. E. R. 2004. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Kolmas painos. San Francisco, USA: Morgan Kauffmann.

FMEA-FMECA.com. 2014. <http://www.fmea-fmeca.com/common-fmea-mistakes.html> (haettu 16. Toukokuu 2014).

Forsyth, D. A., & Ponce, J. 2012. Computer Vision: A Modern Approach. Toinen painos. Harlow, Englanti: Pearson Education Limited.

Kauppinen, H. 1999. Development of a color machine vision method for wood surface inspection. Oulu: Oulun yliopiston kirjasto.

Kujanpää, T. 2012. Konenäkö ikkunateollisuudessa. Ylivieska.

Omron. 2001. Konenäköjärjestelmien valaisutekniikka.

Omron. 2014a. FH / FZ5 Series Vision System/Specifications.

Omron. 2014b. Vision sensor FZ/FH user manual.

Omron. 2014c. Vision system FH-series. FH_eng_0701.pdf. Datalehti.

Omron. 2014d. FH / FZ5 Processing Item Functional Reference Manual.

Pietikäinen, M. & Silven O. 2013. Konenäkö, opetusmateriaali. Oulu: Oulun yliopisto.

Soini, A. 2002. Konenäkö. Opetusmateriaali. Helsinki: Suomen automaatioseura ry.

Weinig group. Weinig Combiscan + C. 2015.

http://www.weinig.com/fileadmin/assets/weinig/products/scanner_systems/DE_Prospekt_CombiScan_Plus.pdf (haettu 21. Maaliskuu 2015).